



VOLUME/ CİLT: 5 (2022)

ISSUE: 2

ISSN: 2687-3052





## Journal of Investigation on Engineering & Technology

<http://dergipark.gov.tr/jiet>



**PUBLISHER:**

*Yayıncı*

Karadeniz Technical University, Faculty of Technology  
*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi*

**PRIVILEGE OWNER (Dean):**

*İmtiyaz Sahibi (Dekan)*

Dr. İrfan ACAR

**EDITOR IN CHIEF:**

*Baş Editör*

Dr. Canan AKSOY

**JOURNAL EDITORS:**

*Dergi Editörleri*

Dr. Canan AKSOY  
Dr. Emin TUĞCU  
Dr. Erol İSKENDER  
Dr. Hamdi Tolga KAHRAMAN  
Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

**ISSUE EDITORS**

*Sayı Editörleri*

Dr. Canan AKSOY

**FIELD EDITORS**

*Alan Editörleri*

Dr. Cemalettin ŞİMŞEK (Karamanoğlu Mehmetbey  
University) Electronics / Electronic Communications  
Engineering

Dr. Tufan ÇAKIR (Gümüşhane University)  
Civil Eng / Geotechnical Division

Dr. Ahmet YILMAZ (Karamanoğlu Mehmetbey  
University) Computer / Software Engineering

**LANGUAGE EDITOR:***Dil Editörü*

Dr. Nilgün MÜFTÜOĞLU (Karadeniz Technical University)

**STATISTICS EDITOR:***İstatistik Editörü*

Dr. Hanefi CALP (Ankara Hacı Bayram Veli University)

**LAYOUT EDITOR:***Mizanpaj Editörü*

Sefa ARAS

**SECRETARY:***Sekreter*

Bora ÇAVDAR

**EDITORIAL BOARD:***Yayın Kurulu*

Dr. Adem DOĞANGÜN (Bursa Uludağ University)  
Dr. Zeki KARACA (Ondokuz Mayıs University)  
Dr. Tayfun DEDE (Karadeniz Technical University)  
Dr. Egemen ARAS (Bursa Technical University)  
Dr. Erdem TÜRKELİ (Ordu University)  
Dr. Erdoğan DOĞDU (Çankaya University)  
Dr. Şeref SAĞIROĞLU (Gazi University)  
Dr. Güngör BAL (Gazi University)  
Dr. M. Ali AKCAYOL (Gazi University)  
Dr. Recep DEMİRCİ (Gazi University)  
Dr. Tuncay YİĞİT (Süleyman Demirel University)  
Dr. Ercan Nurcan YILMAZ (Gazi University)  
Dr. Cemal YILMAZ (Gazi University)  
Dr. Uğur GÜVENÇ (Düzce University)  
Dr. Yusuf SÖNMEZ (Gazi University)  
Dr. Mehmet ŞİMŞEK (Düzce University)  
Dr. İbrahim Alper DOĞRU (Gazi University)  
Dr. Atakan AKSOY (Karadeniz Technical University)  
Dr. Cemaleddin ŞİMŞEK (Karadeniz Technical University)  
Dr. Tuncay BAYRAM (Karadeniz Technical University)  
Dr. Bakiye ÇAKIR (Artvin Çoruh University)  
Dr. Ezgi Taylan KOPARAN (Bülent Ecevit University)  
Dr. Numan DOĞAN (North Carolina State University)  
Dr. Tayebah MOUSAVİ (University of Oxford)  
Dr. Germán F. de la FUENTE (University of Zaragoza)  
Dr. Luis A ANGUREL (University of Zaragoza)  
Dr. Bilge Han TOZLU (Hitit University)

**INDEXING:**

*İndeksler*



ASOS  
indeks

## Product Information

*Ürün Bilgisi*

**Volume** **5** **Issue** **2** **Decemder/2022**  
*Cilt* *Sayı* *Aralık/2022*

**Publisher** Karadeniz Technical University, Faculty of Technology  
*Yayıncı* *Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi*

**Web Page** <http://dergipark.gov.tr/jiet>  
*Web Sayfası*

**Date of Publication** December /2022  
*Basım Tarihi* *Aralık/2022*

**Language** English/Turkish  
*Yayın Dili* *İngilizce/Türkçe*

**Frequency** Published twice in a year  
*Yayın Aralığı* *Yılda iki kez yayınlanır*

**Type of Publication** Periodical  
*Yayın Türü* *Sürekli yayın*

**ISSN Number** 2687-3052  
*ISSN Numarası*

### Yazışma Adresi

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi  
Çamlı M. Hacı Mehmet Baheddin Ulusoy  
Cad. No:144 61830 Of/ TRABZON  
Telefon: +90 462 377 83 01  
E-posta: [jiet@ktu.edu.tr](mailto:jiet@ktu.edu.tr)

Makale gönderimi dergipark üzerinden yapılmaktadır. Tüm yayınlanan makalelere <http://dergipark.gov.tr/jiet> adresinden ulaşılabilir.

### Correspondence Address

Karadeniz Technical University  
Faculty of Technology  
Çamlı M. Hacı Mehmet Baheddin Ulusoy  
St. No:144 61830 Of/ TRABZON  
Phone: +90 462 377 83 01  
E-mail: [jiet@ktu.edu.tr](mailto:jiet@ktu.edu.tr)

Paper submission is done via dergipark. All published papers are available at <http://dergipark.gov.tr/jiet>.



## CONTENTS

### İçindekiler



#### **Research Articles**

*(Araştırma Makaleleri)*

#### **Pages**

*Sayfalar*

On the Quantum Computation and Quantum Information

76-86

*Kuantum Hesaplama ve Kuantum Bilgisi Hakkında*

**Selim KAYA, Necati ÇELİK, Mustafa Nuri URAL**

Elemental Pollution Due to Hydrothermal Alteration: Canca (Gümüşhane-Türkiye)

87-103

*Hidrotermal Alterasyona Bağlı Element Kirliliği: Canca (Gümüşhane-Türkiye)*

**Alaaddin VURAL**

An Analysis of Acoustical Absorption Characteristics of Agro-Waste Materials

104-114

**Adinife AZODO**

Retrospective Evaluation of Renewable and Nuclear Energy Sources

115-134

*Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Kaynaklarının Retrospektif Değerlendirilmesi*

**Alaaddin VURAL, M.Nuri URAL, Ali ÇİFTÇİ**

Brain Computer Interface and Its Future

135-141

*Beyin Bilgisayar Arayüzü ve Geleceği*

**Önder AYDEMİR**

Determination of Magnetic Field Induced Martensitic Transformation Properties  
in Mo Added NiMnSbB Alloys

142-149

*Mo Eklenmiş NiMnSbB Alaşımlarında Manyetik Alan Kaynaklı Martensitik Dönüşüm  
Özelliklerinin Belirlenmesi*

**Murat AYYILDIZ, Gökhan KIRAT, Mehmet Ali AKSAN**



## Kuantum Hesaplama ve Kuantum Bilgisi Hakkında

Selim KAYA<sup>1</sup>, Necati ÇELİK<sup>2</sup>, Mustafa Nuri URAL<sup>3</sup>

(Alınış / Received: 26.09.2022, Kabul / Accepted: 09.11.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Kuantum hesabı  
Kuantum bilgisi  
Klasik ve Kuantum  
hesaplama

**Öz:** Kuantum mekaniği, 1900'lerin ortalarında en önemli başarı ve en gizemli bilimsel teori olarak kabul edilir. Daha sonra, doğanın temel kuvvetleri, nükleer fizik, süper iletkenler vb. dahil olmak üzere çok çeşitli fiziksel fenomenleri anlamak için başarıyla uygulandı. 1900'lerin sonlarına doğru, insanlar sadece doğada bulunan bir kuantum olaylarını incelemek yerine gerçek kuantum sisteminin tasarlanıp tasarlanamayacağını sormaya başladılar. Bununla ilgili olarak ele alınan bazı sorular şunlardır: Bir kuantum durum oluşturmak için gereken uzay ve zaman üzerindeki temel fiziksel sınırlamalar nelerdir? Kuantum sistemlerinin geleneksel klasik yöntemlerle simüle edilmesini zorlaştıran nedir?

Bu çalışmada kuantum biti ve kuantum hesaplayıcılar ile ilgili temel kavramları sunuyoruz ve klasik eşlenikleri ile karşılaştırıyoruz. Ayrıca bir kuantum sisteminin simüle edilmesi hedeflendiğinde karşılaşılan temel zorluklara değiniyoruz.

## On the Quantum Computation and Quantum Information

### Keywords

Quantum computation,  
Quantum Information,  
classical and. quantum  
computation

**Abstract:** Quantum mechanics is considered to be the most important achievement and mysterious scientific theory in mid-1900. Then it was successfully applied to understand a wide variety of physical phenomena including fundamental forces of nature, nuclear physics, superconductors, etc. Toward the end of 1900, people began to ask whether a quantum system can actually be designed instead of looking at them just a phenomena found in nature. Some of the question of interests are: what are the fundamental physical limitation son space and time required to construct a quantum state? What makes quantum systems difficult to simulate by conventional classical means?

In this study, we present the basic concepts of quantum bits and quantum calculators and compare them with their classical counterparts. We also address the main challenges faced when aiming to simulate a quantum system. Frequently used quantum gates are presented.

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

<sup>2</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

<sup>3</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

## 1. Giriş

Kuantum hesaplama ve kuantum bilgi kuramı, kuantum mekanik sistemler kullanılarak gerçekleştirilebilecek bilgi işleme görevlerinin incelenmesidir. Kuantum hesaplama ve kuantum bilgi kuramının amaçlarından biri, kuantum mekaniği hakkındaki sezgilerimizi keskinleştiren ve tahminlerini insan akılları için daha anlaşılır hale getiren araçlar geliştirmektir. Örneğin, 1980'lerin başında, Einstein'ın görelilik teorisiyle açıkça çelişen ışıktan daha hızlı sinyal göndermenin mümkün olup olmayacağına dair bir ilgi uyandı. Sonra genel olarak bir kuantum durumu kopyalamanın mümkün olmadığı ortaya çıktı. 1980'lerde keşfedilen bu klonlanamama teoremi **(1)**, kuantum hesaplama ve kuantum bilgisi kuramının en eski sonuçlarından biridir. **(2,3)**

1970'lerden beri tek kuantum sistemlerini kontrol etmek için birçok teknik geliştirilmiştir. Örneğin, bir "atom tuzağında" tek bir atomu yakalamak ve dünyanın geri kalanından izole etmek için yöntemler geliştirilmiştir. Ve davranışının birçok farklı yönünü inanılmaz bir hassasiyetle araştırmamıza olanak sağlamıştır. Taramalı tünelleme mikroskopu, tek atomu hareket ettirmek ve istediğimiz zaman atomlar ile tasarlayabileceğimiz dizileri oluşturmak için kullanıldı. Çalışması sadece tek elektronların transferini içeren bazı elektronik cihazlar özetlenmiştir.

Tek kuantum sistemleri üzerinde tam kontrol elde etme çabalarının nedeni, tek kuantum sistemleri üzerinde tam kontrol sağlayarak, doğanın el temel parçacıklar seviyesindeki yasalarını keşfetme arzusudur. Başka ne keşfedebiliriz ki, tek kuantum sistemler üzerinde daha eksiksiz bir kontrol elde eder ve onu daha karmaşık sistemlere genişletiriz. Temel olarak kuantum hesaplama ve kuantum bilgileri budur. Kuantum hesaplamanın ve kuantum bilgi kuramının özü budur.

Kuantum hesaplayıcılar, kuantum hesaplamasını gerçekleştirmek için klasik fizik yerine kuantum mekaniğini kullanma fikrine dayanır. Sıradan bir bilgisayarın kuantum bilgisayarı simüle etmek için kullanılabileceği ortaya konulmuştur, ancak simülasyonu verimli bir şekilde gerçekleştirmek imkânsız görünmektedir. **(4)**. Çünkü kuantum bilgisayarlar klasik bilgisayarlara göre önemli bir hız avantajı sunar. Bu hız avantajı o kadar önemlidir ki, birçok araştırmacı klasik hesaplamada akla gelebilecek hiçbir ilerlemenin klasik bir bilgisayarın gücü ile kuantum bilgisayarın gücü arasındaki boşluğun üstesinden gelemeyeceğine inanmaktadır. **(5)**.

1982'de Richard Feynman **(6)** klasik bilgisayarlarda kuantum mekanik sistemlerin simülasyonunda önemli zorluklar olduğuna dikkat çekmişti ve kuantum mekaniği prensiplerine dayalı bilgisayarlar inşa etmenin bu zorlukların üstesinden gelmemizi sağlayacağını öne sürdü.

İyi kuantum algoritmaları ile gelmek iki nedenden dolayı zor görünüyor:

1. İnsan sezgisi klasik dünyaya dayanır. Bu sezgiyi algoritmaların inşasına bir yardım olarak kullanırsak, ortaya koyduğumuz algoritmik fikirler klasik fikirler olacaktır. İyi kuantum algoritmaları tasarlamak için kişinin gerçekten kuantum etkileri kullanarak, tasarım sürecinde en az bir yönden klasik sezgilerini devre dışı bırakması gerekir.
2. Gerçekten ilginç olması için, sadece kuantum mekanik olan bir algoritma tasarlamak yeterli değildir. Algoritma, mevcut tüm klasik algoritmalarından daha iyi olmalıdır. **(7)**

Bu iki sorunun bir araya gelmesi, yeni kuantum algoritmalarının oluşturulmasını gelecek için zor bir problem haline getirmektedir. Bir kuantum bilgisayarda hangi sınıf problemlerinin verimli bir şekilde çözülebileceği ve klasik bir bilgisayarda hangi sınıf problemlerinin verimli bir şekilde çözülebileceği henüz açık değildir. Bu soruları daha iyi anlamak geleceğin önemli problemlerindedir.

## 2. Klasik Hesaplama ve Kuantum Hesaplama

Birçok bilim dalı için hesaplama vazgeçilemez bir gerekliliktir. Bunun için abaküsten Babbage'ın fark motoruna, ENIAC'dan günümüz bilgisayarlarına kadar sürekli bir çaba gösterilmiştir. Boolean'ın önermeleri sadeleştirmek ve üzerlerinde işlem yapabilmek için ortaya koyduğu ilkeler ve Charles Babbage'ın fark motoru ve analitik motoru ile mekanik hesaplayıcılar ortaya çıkmıştır. Büyük ölçekte hesaplamalar için uygun olmasalar da mekanik hesaplayıcılar 1980'lere kadar Türkiye'de de kullanılmakta idi (Bkz. FACIT). Fakat elektronik hesaplayıcılar ortaya çıktığında mekanik hesaplayıcıların çok üzerinde bir performans gösterdiler. Bunun dışında kullanıcı arayüzü olarak daha geniş imkânlar sunuyorlardı.



Klasik hesaplayıcılarda en küçük bilgi birimi bit adını almaktadır. Shannon tarafından tanımlanan bir bit **(8)** ya bir ya da sıfır değerini alabilir. Bundan daha küçük bir veriyi tutmak klasik hesaplayıcılarda mümkün değildir. 8 bit ( $2^3$ ) bir bayta tekabül eder. Klasik bilgisayarları donanımları açısından sınıflamak gerekirse Von Neumann veya Harvard Mimarilerinden birine göre şekillendirilir. Her iki mimaride temelde bellek/bellekler, giriş çıkış (I/O) , aritmetik mantık işlemci (ALU) ve kontrol birimi gibi bölümlerden oluşur. Bu devreler ise kapılardan ya da flip-flop'lardan oluşmakla beraber tasarım açısından tüm kapıların tek bir kapının farklı kombinasyonlarından üretilmesi de yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Klasik hesaplayıcılarda bir problemin çözülebilirliği Turing makinesi testi ile ele alınır. Herhangi bir problem sonlu sayıda adımda bir Turing makinesinde çözülebiliyorsa bu problem kodlanabilir ve elektronik hesaplayıcılar ile çözülebilir bir problem olarak tanımlanır.

Bir probleme ait veriler ve problemin çözümüne yönelik süreçler bir hesaplayıcıya aktarılırken temelde makinenin mimarisine ve özelliklerine göre (register boyutu, komut seti, adresleme genişliği vb.) bitlerden oluşan gruplar şeklinde birler sıfırlar ile makineye aktarılır. Delikli Kartlar döneminde göz önünde olan bu durum günümüzde çok aleni olmasa da hala devam etmektedir. Tek fark şudur ki makinenin anladığı uzun bir sıfır dizilerini hatasız bir biçimde ele almak ve işlemek insan doğasına aykırıdır. Bunun için Assembly dilleri kullanılarak elektronik hesaplayıcıların iç yapısından kaynaklanan işlenebilir tüm komutlara (komut seti) bire bir karşılık gelen sembolik ifadeler (mnemonic) kullanılarak aynı işlem daha anlaşılır bir yöntemle yapılabilmektedir. Fakat makinenin komut setindeki komutlar ileri düzey işlemlere izin vermediği için bir ileri düzey işlemi yapabilmek için birkaç satır kod çalıştırmak gerekebilir. Bu bir giriş aygıtından (örneğin bir klavye) bir baytlık bir verinin (örneğin bir harf) okunması gibi çok sık ihtiyaç duyulan bir işlemin bile yapılması birden fazla basamaktan oluşan bir işlemdir. Bunun için en çok kullanılan, en çok ihtiyaç duyulan işlemler kütüphanelerde toplanarak derleme/yorumlama aşamasında komut setindeki komutlara yine elektronik hesaplayıcı tarafından dönüştürülür. Temel de bilgisayarlar üzerinde geliştirilen her türlü yazılım bu ana temel üzerine şekillendirilir.

Klasik mekanikte sistemlerin durumunu belirlemek ve dinamiğini tanımlamak için iki farklı yöntem uygulanır. Bunlar, Kuvvet kavramına dayalı Newton mekaniği ve Enerji kavramına dayalı Hamilton-Lagrange mekaniğidir. Fakat siyah cisim ışıması, fotoelektrik olayı, çift yarıık deneyi gibi bazı fiziksel olaylar klasik mekanik ilkeleri ile açıklanamamıştır. Bu da bilim adamlarını yeni bir model arayışına mecbur bırakmıştır. Bunun sonucunda kuantum mekaniği ortaya çıkmıştır.

Kuantum mekaniği yalnızca klasik mekaniğin ortaya koyduğu bilimsel anlayışı değil, insanların çevrelerini algılayış şekillerini ve gerçekliğin anlamlandırma şeklini de değiştirmiştir. Kuantum mekaniğinde yeni bilgilere ulaşıldıkça, dünyanın hiç de bizim düşündüğümüz gibi bir işleyişe sahip olmadığını fark etmeye başladık.

Ervin Schrödingerin  $\Psi$  sembolü ile ifade ettiği dalga denklemi ile dalga parçacık ikilemi sona ermiştir. 1927 yılında Werner Heisenberg, Richard Feynman'ın 1982'de yazdığı bir makale ile **(6)** kuantum hesaplamasının klasik hesaplamadan çok daha verimli olabileceğini savunmuştur. Aynı yıllarda Benioff **(9)** ise bu hesaplamalara yönelik mekaniksel modelleri ortaya koymuştur. Deutsch 1985 yılında yayınladığı çalışmasında **(10)** daha sonra Bernstein ve Vazirani tarafından iyileştirilecek olan **(11)** ilk evrensel kuantum bilgisayarının temellerini ortaya koydu. Polinom zamanda tam sayıları çarpanlarına ayıran ve ayrık algoritmaları alan ünlü Shor algoritması **(12)** Peter W. Shor tarafından 1994'te yayınlandı. Hemen iki yıl sonra ise Grover Algoritması ortaya atıldı **(13)**. Shor'un 1995**(14)** ve Preskill'in 1998 **(15)** hata düzeltme kodları ile ilgili makaleleri sayesinde bugün gerçek anlamda bir kuantum bilgisayarın üretilmesi mümkün hale geldi.

Kuantum bilgisayarlar temelde kuantum mekaniğinin ilkelerine göre çalışan hesaplayıcılardır. Ne donanımsal ne de yazılımsal olarak klasik hesaplayıcılarda kullanılan temel yöntemler kuantum hesaplayıcılarda geçerli değildir.

"Bit", klasik hesaplama ve klasik bilginin temel kavramlarıdır. Kuantum hesaplama ve kuantum bilgileri, kısaca kuantum bit veya kübit gibi bir kavram üzerine inşa edilmiştir. Klasik hesaplamadaki yalnızca ya bir ya sıfır değerini alabilen bit kavramının aksine bir kübit 1, 0 ya da bu ikisinin vektörel uzaydaki süper pozisyonundan oluşan bir ara değer alabilir.

Klasik bir bitin 0 veya 1 durumu olduğu gibi, bir kübitin de durumları vardır. Bir kübit için iki olası durum  $|0\rangle$  ve  $|1\rangle$  durumlarıdır. Bu durumlar klasik bir bit için 0 ve 1 durumlarına karşılık gelir. Bitler ve kübitler

arasındaki fark, bir kübitin  $|0\rangle$  veya  $|1\rangle$  dışında da durumlarda bulunabilecek olmasıdır. Durumların lineer kombinasyonlarından oluşan ve süper pozisyon durumları denen durumlarda bulunması da olasıdır. Denklem 1'de verilmiştir.

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (1)$$

Burada a ve b sayıları karmaşık sayılardır. Bir kübit durumunun iki boyutlu karmaşık vektör uzayında bir vektör olduğu da düşünülebilir. Özel durumlar  $|0\rangle$  ve  $|1\rangle$  hesaplama temel durumları olarak bilinir ve bu vektör uzayı için ortonormal bir temel oluştururlar. Bir kübit ölçüldüğünde ya  $|a|^2$  ihtimalle  $|0\rangle$  durumundadır ya da  $|b|^2$  ihtimalle  $|1\rangle$  durumundadır. Olasılıklar toplamı bir olmak zorunda olduğundan  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 'dir. Geometrik olarak kübitin durumu 1 uzunluğuna normalize edilmelidir şeklinde ifade edilebilir. Dolayısıyla, genel olarak bir kübitin durumu, iki boyutlu karmaşık vektör uzayında birim vektördür. Aynı denklem  $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$  vektörü şeklinde de yazılabilir. Bir kübitin gözlemlenmemiş durumunun ve yapılan gözlemin özelliği, kuantum hesaplama ve kuantum bilgilerinin kalbinde yatmaktadır. Örneğin, bir kübit aşağıdaki durumda olabilir. Denklem 2'de verilmiştir.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \quad (2)$$

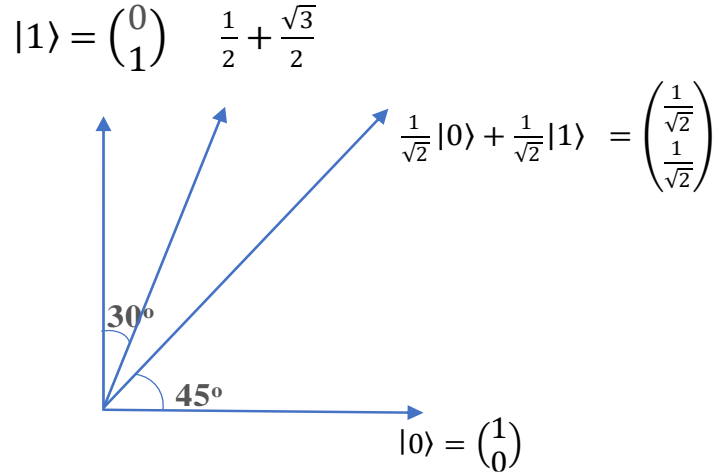
Bu durumu ölçtüğümüzde yüzde elli ihtimalle  $|0\rangle$  ve yüzde elli ihtimalle  $|1\rangle$  sonucunu verir. Dolayısı ile kuantum hesaplayıcılarda kullanılan kübitler

- İki boyutludur.
- Komplekstir.
- Ve birim vektördür.

$$a = 0 \text{ ve } b = 1 \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$a = 1 \text{ ve } b = 0 \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Biz bu vektörlere 0 ve 1 vektörleri diyeceğiz ve klasik bilgisayar sistemindeki bitlerin yerine kullanacağız. Bir ve sıfır vektörleri yanında örnek olası diğer vektörler aşağıda Şekil 1'de gösterilmiştir. Bunlara kubit (qbit) denir.



**Şekil 1.** Bir ve sıfır vektörleri yanında örnek olası diğer vektörler

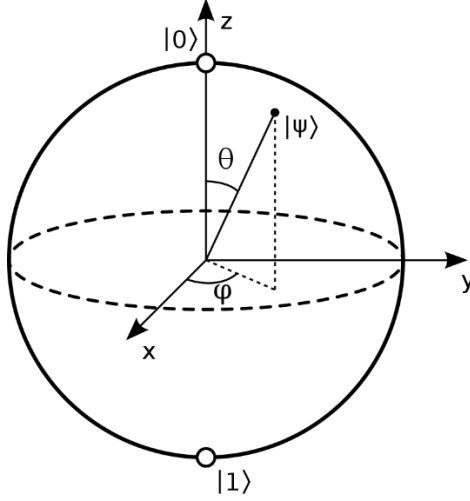
Yukarıdaki şekilde 30 derece için vektörümüzün uzunluğu bir olduğuna göre x ve y bileşenleri sinüs ve kosinüsden  $\frac{1}{2}$  ve  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  olarak kolayca hesaplanabilir. Benzer bir şekilde herhangi bir  $\theta$  açısı içinse;

$$|\psi\rangle = \cos\theta|0\rangle + \sin\theta|1\rangle = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

Denklem 3’de verildiği gibi olacaktır. Gerçek hayatta  $\psi$  vektörü bir elektronun uyarılmış mı uyarılmamış mı olduğunu ifade edebilir, ya da bir fotonun dikey mi yatay mı polarizasyonlu olduğunu ifade edebilir.

Kübit hakkında düşünmeye yarayan yararlı bir gösterim, Bloch küresini kullanan geometrik temsil Şekil 1’de verilmiştir. Tek bir kübitin durumunu şöyle yazabiliriz: Denklem 4’de verilmiştir.

$$|\psi\rangle = e^{i\gamma} \left( \cos\frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin\frac{\theta}{2} |1\rangle \right) \quad (4)$$



Şekil 2. Bloch küresi

Bloch küresinde bir kübit orjin noktasından kürenin içine ya da yüzeyine çizilecek bir vektör ile ifade edilebilir. Sırasıyla yükselti ve azimut açıları  $0 \leq \theta \leq \pi$  ve  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  aralığında olup Bloch küresindeki noktanın yerini temsil eder. Üç numaralı denklemdeki  $e^{i\gamma}$  katsayısı global bir faz faktörü olup gözlenebilir bir özelliği yoktur. Parantez içindeki  $e^{i\varphi}$  ise kübitin,  $|0\rangle$  ve  $|1\rangle$  durumları arasındaki bağıl bir faz faktörüdür, gözlenebilir ve kübitle ilgili çok değerli bilgiler taşır. **(16)**.

Birden çok kübitimiz olduğunu varsayalım. Bu kübitler için temel durumlar  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$  ve  $|11\rangle$ ’dir. Bu sistem için durum vektörü denklem 5’de verilmiştir.

$$|\psi\rangle = a_{00}|00\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle \quad (5)$$

Bu denklem, aşağıdaki şekilde de ifade edildiği gibi her bir vektörün tensör çarpımı şeklinde anlaşılmalıdır.

$$|00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|01\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|10\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|11\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Şeklinde tanımlanabilir. Bu durumda normalizasyon denklemi denklem 6’da verilmiştir.

$$\sum_{i \in \{0,1\}^2} |a_i|^2 = 1 \quad (6)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Bu sistem üzerinde bir ölçme gerçekleştirdiğimizde ikinci kubitin 1 olma olasılığı

$$|a_{10}|^2 + |a_{11}|^2 \quad (7)$$

Denklem 7'de verilmiştir. Ölçmeden sonra durum aşağıdaki yeni vektöre indirgenerek Denklem 8'de verilmiştir.

$$|\psi\rangle = \frac{a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle}{\sqrt{|a_{10}|^2 + |a_{11}|^2}} \quad (8)$$

Doğru bir kuantum durumu için yeni durumun normalizasyon şartlarını sağlayacak şekilde yeniden normalize edilmesi gerektiğine dikkat ediniz.

Fotonları örnek olarak alacak olursak  $\theta$  açılı polarize ışığın bir filtreden geçme ihtimali yukarıda da belirtildiği gibi  $\cos^2 \theta$ ,  $\sin^2 \theta$  olacaktır.

Fakat ışık geçtiği anda ölçme gerçekleştiği için artık geçtiği lensin yönelimindedir.-Arka arkaya koyulmuş bir dikey bir yatay polarizasyon filtresinin arkasına  $\theta$  açılı bir ışığın geçme şansı nedir? Denklem 9'da ki gibi tarif edilebilir.

$$\cos\theta|\uparrow\rangle + \sin\theta|\rightarrow\rangle \quad (9)$$

$|\uparrow\rangle$  Filtreden  $\cos^2 \theta$  ile geçer fakat artık yeni ışığın formülü;  $1|\uparrow\rangle + 0|\rightarrow\rangle$  şeklinde olur bu yüzden yatay filtreden %0 ihtimal ile geçer. (Dikey olsa %100 olacaktır.)

Şimdi ortaya 45 derece açılı bir lens yerleştirildiğini düşünelim. Klasik hesaplama kuramına göre eklenen her lensin ışığın geçme miktarını daha da düşürmesi beklenebilir. En iyi ihtimalle belki etkisi olmaması beklenebilir.

Fakat kuantum hesaplayıcılar açısından durumu ele aldığımızda;

$$\psi_1 = \cos\theta|\uparrow\rangle + \sin\theta|\rightarrow\rangle \quad (10)$$

Filtre  $\uparrow$

$$\psi_2 = 1|\uparrow\rangle + 0|\rightarrow\rangle \quad (11)$$

Filtre  $\nearrow$

$$\psi_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\rightarrow\rangle \quad (12)$$

Filtre  $\rightarrow$

$$\psi_4 = 0|\uparrow\rangle + 1|\rightarrow\rangle \quad (13)$$

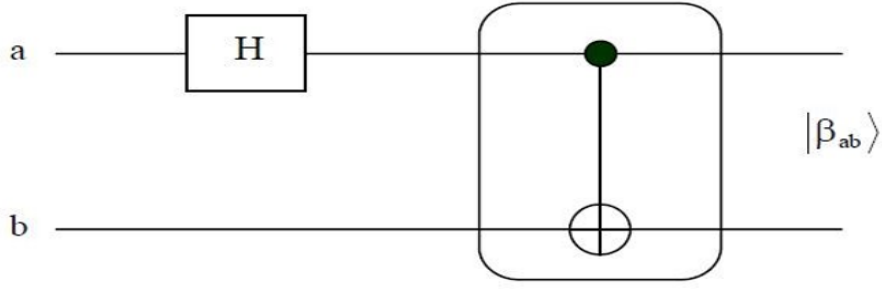
Denklem 10, 11, 12 ve 13'de görüldüğü gibi açılı artan filtre ışığın belli bir kısmının geçmesine neden oldu.

## 2.1. Bell Durumu

Kübitler için önemli bir durum Bell Durumu ya da EPR çifti denklem 14'de gibi tarif edilebilir.

$$\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

Üretmenin en kolay yolu bir Hadamart dönüşümünden sonra kübitleri CNOT kapısından geçirmektir. Aşağıda söz konusu durumun kuantum devresi verilmiştir.

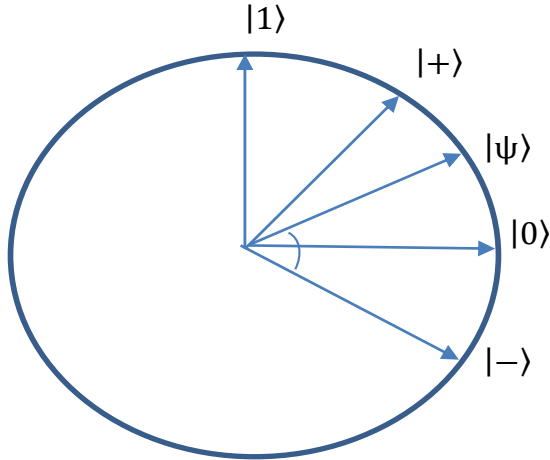


Şekil 3. Bell durumlarını üreten kuantum devresi

Bu durum kuantum hesaplama ve kuantum bilgi kuramı için çok önemlidir ve birçok sürprizden de sorumludur. Kuantum ışınlanma ve süper-yoğun kodlama için anahtar bileşendir. Bell durumu aşağıdaki özelliğe sahiptir. İlk durumu ölçersek, iki olası sonuç elde ederiz:  $\frac{1}{2}$  olasılıkla sıfır ve olarak kalır ve  $\frac{1}{2}$  olasılıkla 1 olarak kalır. Sonuç olarak, ikinci kubitin ölçümü her zaman ilk kubitin ölçümü ile aynı sonucu verir. Bu, ölçüm sonuçlarının ilişkili olduğu anlamına gelir. Ayrıca, Bell durumları kuantum ışınlanma (17) olarak adlandırılan bilgi transferi için gerekli kuantum kanallardır.

Daha genel olarak, n-kübit bir sistemi düşünebiliriz. Böyle bir sistemin hesaplama esası biçimindedir. Böyle bir sistemin kuantum durumu  $2^n$  karmaşık sayıyla belirtilir.  $n = 500$  için, bu karmaşık sayılar ( $2^{500}$ ) evrendeki tahmini atom sayısından daha büyüktür.

Heisenberg kuantum parçacıklarının iki özelliğinin birden kesin şekilde bilinemeyeceğini söylemiştir. Şimdi bu durumu inceleyelim.



Şekil 4. Bir ve sıfır vektörleri yanında + ve - vektörleri

Şekilde 0 ve bir vektörleri ile birlikte + ve - vektörleri tanımlanmıştır. Denklem 15 ve 16'da verilmiştir.

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \quad (15)$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \quad (16)$$

Bu iki vektörün 0 ve 1 olma ihtimalleri  $\frac{1}{2}$ 'dir.

Yalnızca biri + işareti barındırdığı için adı + vektörü diğeri - işareti barındırdığı için adı - vektörü her ikisi  $45^\circ$  açıdır. Şimdi bir  $\theta$  açılı bir  $|\psi\rangle$  ele alalım. Bu vektörün 0,1 ekseninde ve +, - ekseninde özelliğini almak istediğimizi düşünelim. 0,1 ekseninde tam doğrulukla bu  $|\psi\rangle$  nin durumunu bilmek demek  $|0\rangle$  ya da  $|1\rangle$  olması demektir. +, - ekseninde tam doğrulukla bilmek demek  $|+\rangle$  ya da  $|-\rangle$  olması demektir. Bunlardan birinin elektron hızını diğersinin ise konumunu temsil ettiğini düşünelim. Burada Heisenberg'in ortaya koyduğu soru şu iki özellik aynı anda tam olarak bilinebilir mi? Şimdi Şekile 1'e bakıldığında görülecektir ki  $|0\rangle$  ve  $|1\rangle$  vektörleri  $|+\rangle$  ve  $|-\rangle$

45° uzaklıktadır. Dolayısı ile herhangi bir eksene ne kadar yaklaşırsa diğer eksenindeki belirsizlik o kadar artar. Bir eksene tam gelindiğinde diğer eksen için maksimum değer olan  $\frac{1}{2}$  ihtimal genliği meydana gelecektir.

Şimdi  $|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = \beta_0|+\rangle + \beta_1|-\rangle$  kabul edelim.  $S|\psi\rangle$  dağılımı ifade etmek üzere  $S|\psi\rangle = |\alpha_0| + |\alpha_1|$  olsun aynı şekilde,  $S|\psi\rangle = |\beta_0| + |\beta_1|$  olsun.  $S|0\rangle$  için incelersek  $S|0\rangle = 1+0 = 1$  aynı durumda +,- eksenini için açı 45° olacağından  $S|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}$  olacaktır.

Tüm durumlar incelendiğinde görülecektir ki,  $S|\psi\rangle \cdot \bar{S}|\psi\rangle \geq \sqrt{2}$   $\theta$  açısı ve  $|\psi\rangle$  vektörü değişse de bu değişmez.

Süper pozisyon bir vektörün değeri ölçüldüğünde sıfıra ya da bire çöker. Sıfır vektörü yüzde yüz sıfıra, bir vektörü yüzde yüz bire çökerken bunun dışında kalan vektörlerin ölçüldüğünde sonucu belirli bir ihtimalle sıfır ya da bir olabilir. Bu ihtimal hesaplanırken;  $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$  şeklinde bir kübit ölçülürse  $||a||^2$  ihtimalle sıfıra  $||b||^2$  ihtimalle 1'e çökecektir.  $||a||^2 + ||b||^2 = 1$  olduğundan sonucun sıfır ya da bir olma ihtimallerinin toplamı %100'e eşittir.

Örneğin,  $\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$  şeklinde süperpozisyonda olan bir vektörün ölçüldüğünde sonucunun sıfır olma ihtimali

$||\frac{1}{\sqrt{2}}||^2 = \frac{1}{2} = 0.50$  yani yüzde ellidir (yarı yarıya) ve aynı şekilde bir olma ihtimali  $||\frac{1}{\sqrt{2}}||^2 = \frac{1}{2} = 0.50$  yani yüzde ellidir (yarı yarıya).

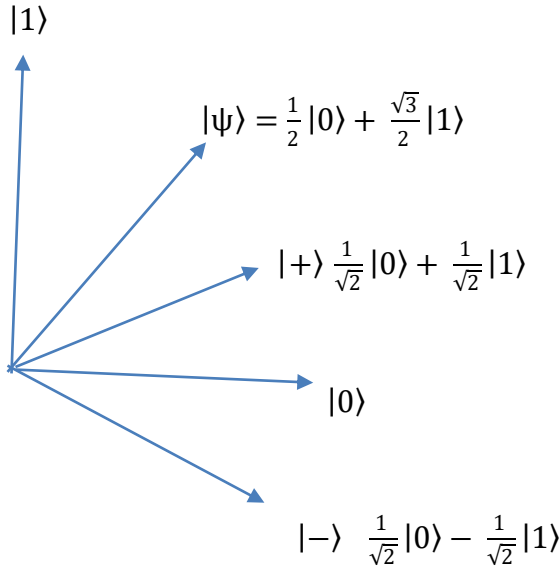
$$|\psi\rangle = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)|0\rangle - \frac{1}{2}|1\rangle + \frac{1}{2}|2\rangle \quad (17)$$

Denklem 17'de ise,

$$P(0) = \frac{1}{2} \rightarrow \text{ihtimal } |\psi^1\rangle = |0\rangle \rightarrow \text{Yeni durum}$$

$$P(1) = \frac{1}{4} \quad |\psi^2\rangle = |1\rangle$$

$$P(2) = \frac{1}{4} \quad |\psi^1\rangle = |2\rangle \text{ olur.}$$



**Şekil 5 .** Bir ve sıfır vektörleri yanında olası diğer + ve - vektörleri

$P[+] = \text{inner product (iç çarpımlar)}$

$$\left[ \left( \frac{1}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \right]^2 = \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \right)^2 = \left( \frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{1+3+2\sqrt{3}}{8} = \frac{2+\sqrt{3}}{4}$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}|0\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|1\rangle \Rightarrow \text{ve } |\psi\rangle = a|+\rangle + b|-\rangle \Rightarrow a \text{ ve } b \text{ hesaplayalım.}$$

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle$$

$$|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle$$

$$\psi = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle \right)$$

$$\psi = \frac{1}{2\sqrt{2}}|+\rangle + \frac{1}{2\sqrt{2}}|-\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}|+\rangle - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}|-\rangle$$

$$\psi = \left( \frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \right) |+\rangle + \left( \frac{1-\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \right) |-\rangle$$

Olur ve az önce yaptığımız P[+] hesabını tekrar yapalım.

$$P[+] = \left( \frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{1^2 + \sqrt{3}^2 + 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot 2} = \frac{1+3+2\sqrt{3}}{8} = \frac{4+2\sqrt{3}}{8} = \frac{2+\sqrt{3}}{4}$$
 önceki sonuçla aynı olduğu görülür.

Klasik bilgisayar devreleri teller ve mantık kapılarından oluşur. Teller, bilgiyi devre etrafında taşımak için kullanılırken, mantık kapıları bilginin manipülasyonlarını gerçekleştirerek bir formdan diğerine dönüştürür. Klasik tek bit mantık kapısına bir örnek, işlemi doğruluk tablosu tarafından tanımlanan,  $0 \rightarrow 1$  ve  $1 \rightarrow 0$  olan 0 ve 1 durumlarının değiştiği NOT geçididir.

Kuantum hesaplama, bir kuantum durumunun nasıl değiştiğinin tanımlanabildiği dildir. Klasik bir bilgisayarın kablolar ve mantık kapıları içeren bir elektrik devresinden oluşmaktadır. Tıpkı bunun gibi, kuantum bilgisayarı, kuantum bilgisini taşımak ve işlemek için teller ve temel kuantum kapıları içeren bir kuantum devresinden yapılıdır.

Benzer bir kuantum NOT geçidi tanımlayabiliriz. Bu süreçte  $|0\rangle$  ve  $|1\rangle$  durumları birbirinin yerine kullanılır. Bu nedenle  $a|0\rangle + b|1\rangle$  durumu NOT geçidi tarafından etkilendikten sonra  $|1\rangle + b|0\rangle$  olarak değiştirilir. NOT geçidi ikiye ikilik bir matrisle temsil edilir,

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$|\Psi\rangle$  durumunu vektör gösterimi olarak yazabiliriz,

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (19)$$

Bu durumda X'in etkisi;

$$X \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \quad (20)$$

olur.

### 3. Sonuçlar ve Yorumlar

Hesaplama genel bir kavramdır. Klasik hesaplama da kuantum hesaplama da belli girdi durumlarında olası çıkışların belirlenmesini amaçlar. Fakat yukarıdaki paragraflarda da belirtildiği gibi klasik hesaplamadaki bit ile kuantum hesaplamada kullanılan kübit, klasik hesaplamanın donanımı ve mimarisi ile kuantum hesaplama için kullanılan donanımlar ve mimari, klasik hesaplamada kullanılan algoritmalar ile kuantum hesaplamada kullanılan algoritmalar birbirlerinden tamamen farklıdır. Bu fark bir yandan klasik hesaplama için bunca yıldır geliştirilmiş yöntemlere, donanımlara ve algoritmalara aşina olan kişiler için göz korkutan boyutta bir yenilik anlamına gelmekle beraber, bir yandan da temel hilbert uzayı, lagrange denklemleri, temel kuantum mekaniği bilgisi, dirac notasyonu vb. Temel kavramları bilen bir gurup için, klasik hesaplama ile çözülmesi imkân dahilinde görünmeyen birçok problemin çözülebileceği yeni ve henüz hangi noktalara bile ulaşacağı öngörülemeyen yepyeni bir evrenin, yepyeni hesaplama imkanlarının kapısını aralanmaktadır.

Bu çalışmada klasik hesaplamada kullanılan temel bilgi birimi, temel donanım ve mimariler ve temel mantık ve yapılar ile bunların kuantum hesaplayıcılardaki eşlenikleri bir arada sunulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın hem kuantum hesaplayıcıları merak eden önemli bir kitle için bir başlangıç noktası teşkil etmesi umulmakta hem de kuantum hesaplayıcılar için en temel kavramlardan bazılarını bir arada sunarak, özellikle konu ile ilgili Türkçe kaynak sıkıntısı çeken kişiler için kaynak teşkil etmesi amaçlanmaktadır.

Bu kısa çalışmada elbette kuantum hesaplayıcılar ile ilgili tüm konuların ele alınması mümkün olmamıştır. Kuantum hesaplayıcılar ile ilgili çok önemli olan fakat ele alınmamış bazı konular mevcut olmak ile birlikte çalışmanın kuantum hesaplayıcıların doğasına dair önemli ipuçları içermektedir. Kuantum hesaplayıcılar ile ilgili diğer önemli konuların da, örneğin, Deutsch-Jozsa algoritması (18), Grover algoritması (19), Shor algoritması (20), benzer makaleler ile ortaya konması, Türkçe kaynak sıkıntısı çekilen kuantum hesaplayıcılar alanına önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

### **Teşekkür**

Bu bölümde; çalışmaya katkısı olan kişi veya kurumlara teşekkür edilmelidir. Projeden üretilen makalelerde proje desteği belirtilmelidir.

### **Yazar Katkı Oranları**

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### **Kaynakça**

- [1] Wootters, W. K., & Zurek, W. H. (2009). The no-cloning theorem. *Physics Today*, 62(2), 76-77.
- [2] Einstein, A. (1905). On the Electrodynamics of Moving Bodies *Annalen der Physik*. Vol. 17,322 (10).
- [3] Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?. *Physical review*,47(10), 777.
- [4] Zhou, Y., Stoudenmire, E. M., & Waintal, X. (2020). What limits the simulation of quantum computers?. *Physical Review X*, 10(4), 041038.
- [5] Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2001). Quantum computation and quantum information. *Phys. Today*,54, 60-2.
- [6] Feynman R. P , (1982). Simulating physics with computers”, *International Journal of Theoretical Physics* 21:6/7, s.467-488.
- [7] Nielsen, M. A., & Chuang, I. (2002). Quantum computation and quantum information.
- [8] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, 27(3), 379-423.
- [9] Benioff, P. A. (1982). Quantum mechanical Hamiltonian models of discrete processes that erase their own histories: Application to Turing machines. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(3-4), 177-201.
- [10] Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 400(1818), 97-117.
- [11] Bernstein, E., & Vazirani, U. (1997). Quantum complexity theory. *SIAM Journal on computing*, 26(5), 1411-1473.
- [12] Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. In *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science*, p. 20-22.
- [13] Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. In *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing* (pp. 212-219).
- [14] Shor, P. W. (1995). Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory. *Physical review A*,52(4), p. 2493-2496.
- [15] Preskill, J. (1998). Robust solutions to hard problems. *Nature*, 391(6668), 631-632.
- [16] Ulucan, H. (2017). Süperilerken Kubitli Kuantum Bilgisayarlar ve Kuantum Hesaplama, yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü



- [17] Gisin, N., & Bechmann-Pasquinucci, H. (1998). Bell inequality, Bell states and maximally entangled states for  $n$  qubits. *Physics Letters A*, 246(1-2), 1-6.
- [18] Collins, D., Kim, K. W., & Holton, W. C. (1998). Deutsch-Jozsa algorithm as a test of quantum computation. *Physical Review A*, 58(3), R1633.
- [19] Grover, L. K. (1997). Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack. *Physical review letters*, 79(2), 325.
- [20] Shor, P. W. (1999). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM review*, 41(2), 303-332.



## Hidrotermal Alterasyona Bağlı Element Kirliliği: Canca (Gümüşhane-Türkiye)

Alaaddin VURAL<sup>1</sup> 

(Alınış / Received: 20.09.2022, Kabul / Accepted: 07.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Hidrotermal alterasyon  
Element Kirliliği/Zenginleşmesi  
Jeobirikim İndeksi ( $I_{geo}$ )  
Zenginleşme Faktörü (EF)  
Kirlilik İndeksi (PI)  
Birleşik Kirlilik İndeksi (IPI)

**Öz:** Bu çalışma kapsamında hidrotermal alterasyon sahalarındaki muhtemel element kirliliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Canca (Gümüşhane-Türkiye) hidrotermal alterasyon sahasından toplanmış 288 adet toprak örneğinin element içerikleri kabul gören referans değerleri (background values) ile kıyaslanmış ve değişik kirlilik parametreleri ile de irdelenmiştir. Çalışma sonucunda sahaya ait major element (sodyum, magnezyum, alüminyum ve kalsiyum) konsantrasyonlarının, potasyum elementi hariç, yerel ve bölgesel ortalama değerlerine yakın olduğu, potasyum elementinin ise kabul gören ortalama değeri aştığı tespit edilmiştir. Değerlendirilmeye alınan ağır metal ve iz elementlerin ise çoğunlukla değişen oranlarda kabul edilen ortalama değerlerini aştığı tespit edilmiştir. Element konsantrasyonları ayrıca Jeobirikim İndeksi ( $I_{geo}$ ), Zenginleşme Faktörü (EF), Kirlilik İndeksi (PI) gibi kirlilik parametreleri incelenmiştir. Kirlilik parametre verilerine göre, genel manada sahada iz element ve ağır metallere değişen oranlarda element kirliliği/zenginleşmesinin varlığı tespit edilmiştir. Sahadaki örnek alım noktalarının incelenen tüm elementler açısından kirlilik derecesi ise Birleşik Kirlilik İndeksi (IPI) incelenmiştir. IPI verilerine göre de sahada örnek alım noktalarının çoğunlukla orta ve yüksek kirlilik sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular alterasyon sahalarının maden arama amaçlı çalışmalarda hedef sahalardan olmasının yanında element kirliliği/zenginleşmesi için incelenmesi gereken sahalardan olduğu teyit etmiştir.

## Elemental Pollution Due to Hydrothermal Alteration: Canca (Gümüşhane-Türkiye)

### Keywords

Hydrothermal alteration  
Element Pollution/Enrichment  
Geoaccumulation Index ( $I_{geo}$ )  
Enrichment Factor (EF)  
Pollution Index (PI)  
Integrated Pollution Index (IPI)

**Abstract:** In this study it is aimed to investigate possible elemental pollution in hydrothermal alteration areas. For this purpose, the element contents of 288 soil samples collected from the Canca (Gümüşhane-Turkey) hydrothermal alteration area were compared with the accepted average values (background values) and examined with different pollution parameters. As a result of the study, it was determined that the major element (sodium, magnesium, aluminium, and calcium) concentrations of the area were close to the local and regional background values, except for the potassium element, while the potassium element exceeded the accepted background value. It has been determined that the heavy metals and trace elements that are taken into consideration mostly exceed the accepted background values in varying proportions. Element concentrations were also investigated by pollution parameters such as Geoaccumulation Index ( $I_{geo}$ ), Enrichment Factor (EF), and Pollution Index (PI). According to the pollution

<sup>1</sup> Gümüşhane University, Department of Geological Engineering, Gümüşhane/Türkiye

parameter data, the presence of element pollution/enrichment at varying rates with trace elements and heavy metals in the field, in general terms, has been determined. The Integrated Pollution Index (IPI) of the sampling points in the area for all investigated elements was also examined. According to the IPI data, it has been determined that the sampling points in the field are mostly in the medium and high pollution classes. The findings confirmed that the alteration areas are the target areas in mineral exploration studies, as well as the areas that need to be examined for elemental pollution/enrichment.

## 1. Giriş

İnsanın doğa ile etkileşimi varoluşu ile birlikte başlamıştır (Vural et al., 2009). Yeryüzü insana yurt olmuş, aş olmuş, yuva olmuştur. İnsan içinde yaşadığı coğrafyanın imkanları kullanmaya başlamış, yaşamını idame ettirebilmek için çok çeşitli el aletlerini yaşadığı coğrafyanın imkanlarından yararlanarak icat etmiş, bazen de keşiflerde bulunmuştur. Yaşadığı coğrafyanın sunduğu imkanların da yardımıyla hatta bazı topluluklar diğer topluluklara karşı avantaj ve üstünlük elde etmiştir (Çiftçi et al., 2021). Örneğin obsidiyenin bulunduğu bölgelerde yaşayanlar, granit gibi işlenmesi ve keskin yüzeyler vermesi güç olan bölgelerde yaşayanlara göre avantaj kazanmış ve bir manada da teknolojik olarak diğerlerine üstünlük sağlamışlardır. Özellikle örgütlü savaşların olduğu dönemlerde ise bakırdan ziyade demire daha kolay ulaşanlar, savaş aletlerinde kazandıkları avantajlarla diğer topluluklar üzerinde üstünlük kazanmışlardır (Çiftçi et al., 2021). Özellikle de sanayi devriminden sonra hammaddelerin/enerji hammaddelerinin öneminin artması ile birlikte bu madenlere sahip olan coğrafyalar önem kazanmış ancak bu durumda da siyasi ve askeri olarak güçlü olanlar daha güçlenirken, doğal kaynaklarını korumaya muktedir olmayanlar ise askeri olarak güçlü olanların sömürgeci durumuna düşmüştür (Vural et al., 2022). Doğal kaynak alanları, ortalama değerlere göre aranan materyalin/madenin/elementin referans değerlerinden (background değeri) pozitif yönde sapma gösterdiği alanlardır. Bu alanlar her zaman yüzeylenmiş olarak bulunmazlar, bazen ise gömülü olarak yer altında keşfedilmeyi beklerken yüzeyde ise bazı işaretler/emareler göstererek (yoğun hidrotermal alterasyon gibi) kendilerini belli ederler (Vural, 2020). Bu tür sahalar keşfedilerek ekonomiye kazandırılmakta, insanlığın refahı için kullanılmaktadır. Ancak bu durumda da gerek işletme, gerek işletme sonrası ve/veya işletilmiş materyallerin/madenlerin değerlendirilmesi aşamasında bazı çevresel sorunlar da kendini göstermektedir (Sungur et al., 2020). Bazı durumlarda ise ortalama değerlere göre gözlenen zenginleşme ekonomik boyutlara ulaşmamakta ancak doğal kaynaklı metal/element kirliliği ilgili coğrafya için söz konusu olabilmektedir.

Gümüşhane'de bulunan Canca hidrotermal alterasyon sahası halihazırda element zenginleşmelerine rastlanan ve ekonomik olarak da değerli metal potansiyeli taşıyan önemli bir sahadır. Sahada 1980'lerden sonra özellikle Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından değerli metal arama çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sahada altın için MTA Genel Müdürlüğü buluculuk hakkı da kazanmıştır (Güner et al., 2005; Güner & Yazıcı, 2011; Vural, 2019a). Saha zaman zaman özel şirketlerce maden arama amaçlı ruhsatlandırılmıştır. Özellikle epitermal altın yataklarının önem kazanması ile sahada 2000'li yılların başından itibaren de çok sayıda maden arama amaçlı çalışma gerçekleştirilmiştir. Sahada hem maden aranmasına yönelik hem de doğal radyasyon içerikli çevre kirliliği açısından yapılmış çalışmalar mevcuttur (Vural, 2022). Alterasyon sahalarının çevre kirliliği riskini konu alan tıbbi jeoloji ve biojeokimya amaçlı çalışmalar da yine saha gerçekleştirilmiştir.

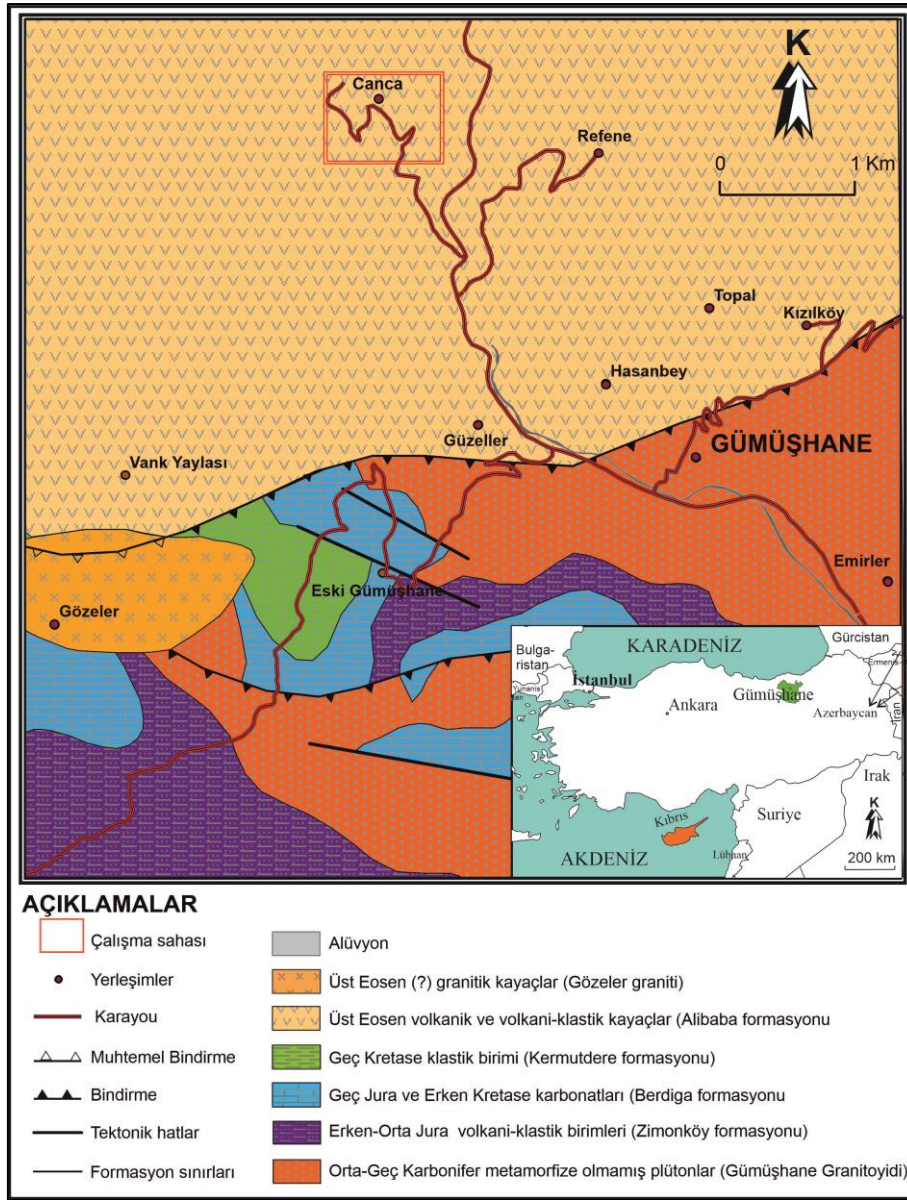
Bu çalışmanın amacı, değişik araştırmalarla element zenginleşmesinin varlığı tespit edilen Canca (Gümüşhane) hidrotermal alterasyon sahasında tespit edilen element konsantrasyonlarının yerel ve bölgesel referans değerleriyle kıyaslanması ve kirlilik parametreleriyle incelenerek kirlilik riski taşıyan elementler açısından incelenmesidir. Aynı zamanda da alterasyon sahalarının element riski potansiyellerinin ortaya konmasıdır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Sahanın coğrafik özellikleri ve genel jeolojisi

Yoğun hidrotermal alterasyon gelişimin gözlemlendiği Canca sahası (Gümüşhane, Türkiye), Türkiye'nin önemli metalojeni kuşağı içinde olup, Türkiye'nin önemli tektonik kuşaklarından olan Karadeniz Tektonik Birliği'nin güney zonunda yer alır (Şekil 1). Çalışmaya konu saha yaklaşık 2 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsamakta olup, Gümüşhane'nin 10 km batısındadır. Bölge, jeolojik ve jeotektonik evriminin bir sonucu olarak engebeli bir topoğrafya gösterir. Bölge denizel ve karasal iklim arasında geçişli iklimsel özellik gösterir. Buna bağlı olarak yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk ve ağırlıklı olarak da kar yağışlıdır. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre, kışları sıcaklıklar -5.8 ile +4.9 °C yazları ise 10.6 ile 28.5 °C arasında değişmekte olup, yıllık yağış ise ortalama 451.4 kg/m<sup>2</sup>'dir. Canca sahası engebeli bir topoğrafyaya sahip olmakla birlikte

değişen kalınlıklarda sahip toprak gelişimi gösterir. Sahadaki hidrotermal alterasyon, iklimsel özellikleri ve bitki örtüsünün de etkisi ile toprak örtüsü gri, açık kahverenginde olup, podzoliktir ve asidik-nötral karakterdedir.



**Şekil 1.** Canca hidrotermal alterasyon sahasının bulduru ve jeoloji haritası ((Güven, 1993)'den değiştirilerek alınmıştır).

Bölgenin temelini Erken-Orta Karbonifer yaşlı metamorfik kayalar ve bu kayaları kesen Orta-Geç Karbonifer yaşlı metamorfize olmamış granitik kayalar oluşturur (Sungur et al., 2020; Topuz et al., 2010; Vural & Kaygusuz, 2019; Yılmaz, 1972), sırasıyla Kurtoğlu Metamorfitleri ve Gümüşhane Granitoidi. Bu temel kayalar uyumsuz olarak Erken-Orta Jura volkano-klastik birim tarafından üzerlenmektedirler (Zimonköy formasyonu, bazı kaynaklarda Şenköy formasyonu olarak geçmektedir) (Eren, 1983). Zimonköy formasyonu dereceli olarak Geç Jura ve Erken Kretase yaşlı, Pelin (1977) tarafından Bergida formasyonu olarak adlandırılmış karbonat kayalarına geçer. Bergida formasyonu ise uyumlu olarak Geç Kretase klastik birimler tarafından örtülmektedir (Kermutdere formasyonu) (Tokel, 1972) (Şekil 1). Kermutdere formasyonu tabanda kumlu kireçtaşı ile başlar üste doğru ise dereceli olarak kırmızı pelajik kireçtaşlarına ve sonrasında kumtaşı, silttaşı marn ve kireçtaşlarından oluşan türbiditik bir seriye geçiş gösterir. Kermutdere formasyonun eşleğini Doğu Karadeniz Tektonik Birliğinin Kuzey Zonunda volkanik kayalarla temsil edilmektedir. Gümüşhane'nin batı-güneybatısında Avliyana ve yakın çevresinde ve Gümüşhane doğu-kuzeydoğusunda Demirören ve çevresinde Geç Kretase yaşlı bu volkanik kayalar geniş alanlarda yüzlek vermektedir. Geç Kretase yaşlı Kermutdere formasyonu Canca sahası kuzeybatısında Geç Kretase intrüzyonları tarafından kesilmektedirler (Kaygusuz et al., 2008b). Geç Kretase yaşlı plütonik, volkanik ve sedimanter kayalar, Alibaba formasyonu olarak adlandırılan ve stratigrafik olarak Orta-Geç Eosen yaşlı volkanik ve volkani-klastik birimlerce üzerlenirler (Arslan & Aliyazıcıoğlu, 2001; Güven, 1993)

ve bu formasyon bölgenin değişik kesimlerinde eş yaşlı kalk-alkalin granitoyitik kayaçlarca kesilir (Kaygusuz et al., 2008a). Bölgedeki en genç birimler ise kuvaterner alüvyonlar, yamaç molozları ve güncel travertenlerdir.

Canca hidrotermal alterasyon sahası ve yakın çevresinde Orta-Geç Eosen yaşlı Alibaba formasyonu yüzeylenmektedir (Şekil 1 ve 2). Formasyon sahada bazalt ve andezitlerden meydana gelmekte olup, yer yer Eosen volkanizmasının son ürünü olan andezit-dolerit dayklarınca da kesilmektedirler. Çalışma sahasının güneyinde, sahaya yakın bir lokasyonda Üst Eosen yaşlı, monzogranitik karakterdeki granitik kayaç Alibaba formasyonunu kesmektedir. Canca sahasında gelişmiş yaygın hidrotermal alterasyonun kökeninin bu granitik kayaç olduğu düşünülmektedir. Hidrotermal alterasyon gelişiminde etkin olan akışlar bölgenin neotektonik evrimi sonucunda gelişmiş D-B yönünde baskın, hafif KB-GD doğrultulu tektonik hatları kullanarak sığ jeokimyasal ortama ulaşmış ve sahadaki andezitik kayaçları etkileyerek bu tektonik hatlara paralel olarak hidrotermal alterasyon gelişimine neden olmuşlardır (Vural, 2019a).

Sahadaki alterasyon türleri çoğunlukla silisleşme, killeşme, hematitleşme, limonitleşme ve piritleşmeler şeklinde olup, baskın alterasyon türü silisleşmelerin yoğun olarak geliştiği fillik alterasyondur. Silisleşmeler özellikle sahanın batı kesiminde yayılım gösterirken, diğer kesimlerde ise kaolinit, simektit ve illit oluşumları (baskın olarak arjilik alterasyon) söz konusudur. Bunlara yer yer alünit, kalsedon, jips damar/damarcıkları eşlik eder (Şekil 2).

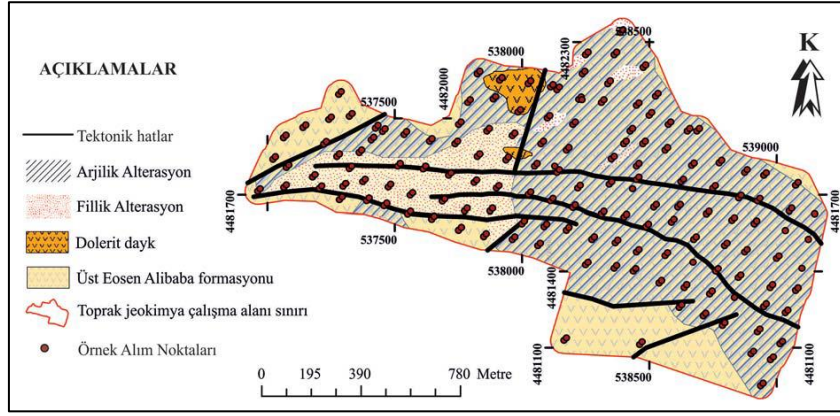
## 2.2. Örnekleme ve Analiz

Canca hidrotermal alterasyon sahasında 288 noktadan toplanmış yüzey toprağı (0-25 cm) örneklerinin (Şekil 2) ana, iz element ve ağır metal konsantrasyonları sahanın element kirliliği riskinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Örnekleme ve örneklerin analize hazırlanma süreç ve prosedürleri Vural (2019a)'da detaylı olarak verilmiştir. Arazi çalışması aşamasında örneklerin toplanmasında sekonder/harici etkilenmelerin olmaması için azami hassasiyet gösterilmiştir. Örnekler naylon poşetler alınarak numaralandırılmış ve sonrasında ise ikinci bir naylon poşet ile de korumaya alınarak laboratuvara götürülmüştür. Örneklerin analize hazırlanması Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada örnekler 60°C sıcaklıkla 2 gün boyunca etüvde kurutulmuş, böylece doğal nemleri uzaklaştırılan örnekler 2 mm polietilen elekten geçirilmişler ve öğütüldükten sonra uygun tane boyutunu elde etmek için Rose et al. (1991) önerdiği şekilde 80 –mesh polietilen elekten geçirilerek, mikro-dalga fırında değişik oranda asitlerle çözüldürülmüştür. Çözüldürülmüş örnekler Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) (Agilent 7700e model ICP-MS, Agilent Technologies, Santa Clara, California, USA) ile belli başlı elementler (Na, Mg, Al, K, Ca, Mn, Fe, Bi, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, As, Se, Sr, Mo, Sb, Cd, Ba, Hg, Sn, Th) için analiz edilmiştir. Analiz öncesinde toz haline getirilmiş örneklerden 0.20 g civarında 0.1 mg hassasiyette tartımlar alınmış, mikrodalga fırının (SINEO MDS-8G, Sineo Microwave Chemistry Technology Co., Ltd.,China) teflon beherlerine konarak, üzerlerine 4 mL NHO<sub>3</sub>, 2 mL HF ilave edilerek, Vural (2019b)'da verilen koşullarda (I. aşama koşulları) parçalanmaya tabi tutulmuş, akabinde ise elde edilen çözeltiye 5 mL B<sub>3</sub>OH<sub>3</sub> ilave edilerek yine Vural (2019b)'da verilen koşullarda (II. aşama koşulları) tekrar parçalanmaya maruz bırakılmıştır. İki aşamalı bu süreç sonrasında elde edilen beher içerikleri cam pamuğundan süzölmüş ve elde edilen berrak çözeltilere saf su ilave edilerek 50 mL'ye kantitatif olarak tamamlanmıştır. Bu süreçler sonrasında ise örneklerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuçların güvenilirliğinin kontrolü amacıyla; her bir örneğin en az 3 kez tekrarlı analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen konsantrasyonların ortalama ve standart sapmaları hesaplanarak analizin doğruluk ve kesinliği belirlenmiştir. Yine bu amaçla standart kalibrasyon grafiğı kullanımıyla birlikte örneklere standart ekleme ve iç standardı yöntemleri de kullanılmıştır. Örnek çözeltilerine ekleme/geri kazanma testleri (spiked/recovery) uygulanarak, metodun Standart Referans Maddelere (SRM) de uygulanmasıyla doğruluk testleri de tamamlanmıştır. Analiz detayları Vural (2019a)'de verildiğı için bu çalışmada ayrıca verilmemiştir.

Toprak örneklerinin pH ölçümleri yine Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. pH ölçümleri için toprak örnekleri 100 meşlik elekten geçirilmiş ve etüvde 60 °C'ta 2 gün bekletilerek doğal nemleri uzaklaştırılmış, akabinde toprak örnekleri (2:2.5; kütle(gr):hacim (mL)) oranında örnek:ultra saf su karışımıyla 50 mL'lik falcon tüplere yerleştirilmiş ve titreşim masasında 60 dakika çalkaladıktan sonra yaklaşık 10 saat kadar beklenerek sudaki asıltıların çökmesi sağlanmıştır. pH ölçümleri Hanna marka masaüstü pH metre ile yapılmıştır. Toprak örneklerinin pH'larının 3.90-7.02 arasında değiştiğı dolayısıyla sahadaki toprakların çok asidik bir miktar nötr karaktere yaklaştığı belirlenmiştir.





Şekil 2. Çalışma sahası alterasyon haritası ve örnekleme lokasyonları (Vural, 2019a'dan değiştirilmiştir)

### 2.3. Verilerin değerlendirilmesi

Toprak, sediment ve tozlarda metal zenginleşmesi ve kirliliğin derecesinin hesap edilmesi için pek çok değişik parametre önerilmektedir. Bunların belli başlıları jeo-birikim indeksi ( $I_{geo}$ ), zenginleşme faktörü (EF), kirlilik indeksi ve birleşik kirlilik (IPI) indeksidir. Bu çalışmada bahse konu kirlilik indeksleri bir arada kullanılarak sahadaki kirlilik riski belirlenmeye çalışılmıştır.

$I_{geo}$  Muller (1969) tarafından önerilmiş olup, aşağıdaki formül ile hesap edilir:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_i}{1,5 * B_i} \quad (1)$$

Burada,  $C_i$  incelenen örnekteki elementin konsantrasyonu,  $B_i$  ise elementin üst kabuktaki referans değeridir. Üst kabuk değerleri çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılmış ve farklı referans değerler önerilmiştir. Bunlardan en güncel olanı ise Rudnick ve Gao (2010) tarafından önerilen değerlerdir. Bu çalışmada Kaygusuz (2008b)'in yayınlarında verilen ve Canca sahasını da karakterize eden kayaçların element içeriklerinin medyanları, bölgeyi daha iyi temsil edeceği düşüncesiyle, genel olarak referans değerler olarak kabul edilmiştir.  $I_{geo}$  parametresindeki 1.5 katsayısı litolojik kaynaklı etkileri bertaraf etme amacıyla önerilmiştir. Jeobirikim İndeksi verileri Muller (1969) tarafından 0-6 arasında 7 sınıfa ayrılmıştır (Tablo 1).

Çalışmada kullanılan bir diğer kirlilik indeksi ise Zenginleşme Faktörü (EF)'dir. Zenginleşme faktörü ilk defa Buat-Menard ve Chesselet (1979) tarafından önerilmiştir ve aşağıdaki formülle hesap edilir:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_i}{C_{ref}}\right)_{sample}}{\left(\frac{B_i}{B_{ref}}\right)} \quad (2)$$

Burada,  $C_{i(sample)}$  incelenen elementin ve  $C_{ref(sample)}$  aynı noktada referans elementin konsantrasyonuna karşılık gelir.  $B_i$  incelenen elementin referans değerine,  $B_{ref}$  ise referans elementin referans değerini temsil etmektedir. Referans element seçimi yapılırken elementin nispeten düşük konsantrasyonda olması ve aynı zamanda da mümkünse hareketsiz veya hareketliliğinin düşük olmasına dikkat edilir. Böylece bir nevi jeokimyasal ortamda kaynaklı olarak elementlerin hareketliliklerine bağlı değişimler minimize edilmeye çalışılır. EF parametresi hesabında çoğunlukla referans element olarak Al, Fe, Ti, Si, Sr, Zr, K, vb. elementler kullanılmaktadır (Feng et al., 2004; Mandal & Sengupta, 2003). Bu çalışmada, ortamın pH değeri de dikkate alınarak bu ortamda daha az hareketli olacağından referans element olarak Al seçilmiştir. Alüminyumun bölge kayaçlarındaki bolluğu medyan cinsinden % 8,8 olarak bulunmuştur. EF faktörü Sutherland (2000) tarafından 5 zenginleşme sınıfına ayrılmıştır (Tablo 1).

Canca sahası kirliliğinin araştırılmasında kullanılan bir diğer kirlilik parametresi Kirlilik İndeksi (PI) olup, aşağıdaki formül ile hesaplanır (Chen et al., 2005):

$$PI = \frac{C_i}{B_i} \quad (3)$$

Burada  $C_i$  incelenen elementin konsantrasyonu,  $B_i$  ise incelenen elementin background değerine karşılık gelir. PI değerine göre ortamın element içerikleri Düşük Kirli, Orta Kirli ve Yüksek Kirli olarak sınıflara ayrılmaktadır (Tablo 1).

Bir diğer kirlilik parametresi ise her bir örnek yeri için ölçülen elementlerin PI değerlerinin geometrik ortalamasıyla belirlenen Birleşik Kirlilik İndeksi'dir (IPI). IPI değeri de üç ayrı sınıfa ayrılmaktadır: Düşük Kirli ( $IPI \leq 1$ ), Orta Kirli ( $1 < IPI \leq 2$ ) ve Yüksek Kirli ( $IPI > 2$ ) (Chen vd. 2007).

**Tablo 1.** Farklı Kirlilik İndekslerine ait kirlilik sınıflandırmaları

Jeobirikim İndeksi (Igeo)			Zenginleşme Faktörü (EF)			Kirlilik İndeksi (PI)		
C	Değer	Kirlilik sınıfı	C	Value	Kirlilik sınıfı	C	Value	Kirlilik sınıfı
0	$I_{geo} \leq 0$	Kirlenmemiş	1	$EF < 2$	En az zenginleşmiş	1	$PI \leq 1$	Düşük kirlenme
1	$0 < I_{geo} < 1$	Kirlenmemiş-Orta Kirli	2	$2 < EF < 5$	Orta zenginleşmiş	2	$1 < PI \leq 3$	Orta kirlenme
2	$1 < I_{geo} < 2$	Orta Kirli	3	$5 < EF < 20$	Önemli zenginleşmiş	3	$(PI > 3)$	Yüksek kirlenme
3	$2 < I_{geo} < 3$	Orta-Ağır Kirli	4	$20 < EF < 40$	Çok önemli zenginleşmiş			
4	$3 < I_{geo} < 4$	Ağır Kirli	5	$EF > 40$	Aşırı yüksek zenginleşmiş			
5	$4 < I_{geo} < 5$	Ağır-Aşırı Kirli						
6	$I_{geo} > 5$	Aşırı Kirli						

### 3. Bulgular

#### 3.1. Sahadaki element konsantrasyonlarının genel değerlendirilmesi

Sahaya ait analizleri gerçekleştirilen örneklerin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca elementlerinin konsantrasyonlarının kıyaslanması amacıyla Rudnick ve Gao (2010)'a ait üst kabuk değerleri ve bölgeye ait hesap edilmiş referans değerleri (background değerleri) de Tablo 2'de verilmiştir. Referans değerlerinin hesaplanmasında Materyal ve Metod Bölümü'nde de belirtildiği üzere çalışma sahasını karakterize eden kayaç verileri kullanmıştır. Bu amaçla Kaygusuz (2008b)'in verilerine ait 45 adet kayaç örneğinin element içeriklerinden yararlanılmıştır.

**Tablo 2.** Canca hidrotermal altersayon sahası topraklarının element konsantrasyonlarına ait tanımlayıcı istatistik bilgileri ve elementlerin referans değerleri. Tablo'da Na, Mg, Al, K, Ca, Fe ve Cr elementlerinin konsantrasyonu % cinsinden, iz elementler ise mg/kg olarak verilmiştir. Sadece Hg  $\mu\text{g}/\text{kg}$  olarak verilmiştir.

	N	Minimum	Maksimum	Ortalama	Medyan	Geo.Ort	Std. Sap.	Basıklık	Çarpıklık	Ref. D.*	Ref. D..
Na	142	0.040	2.600	0.993	0.980	0.772	0.552	-0.402	0.206	2.430	2.099
Mg	142	0.121	2.008	0.873	0.899	0.751	0.420	-0.287	0.280	1.496	1.78
Al	142	2.011	10.585	7.007	6.827	6.750	1.812	-0.361	-0.033	8.150	8.8
K	142	0.616	2.673	1.464	1.444	1.392	0.465	-0.076	0.552	1.163	1.34
Ca	142	0.329	2.308	0.872	0.800	0.823	0.331	4.186	1.832	2.566	4.12
Mn	269	24.000	2745.480	597.764	525.570	497.075	357.105	5.893	1.717	770.000	1084
Fe	124	1.360	11.440	4.559	4.400	4.311	1.546	2.337	0.982	3.530	4.62
Bi	40	5.000	89.000	18.275	12.000	13.362	17.723	6.433	2.392	0.160	-
Sc	124	2.710	58.740	18.642	18.435	16.322	8.503	2.867	0.670	14.000	8
V	269	3.240	352.980	120.368	112.000	108.641	51.540	1.904	1.033	97.000	187.5
Cr	121	0.008	0.054	0.016	0.015	0.014	0.009	1.310	1.099	0.009	0.015
Co	282	0.880	49.980	14.127	13.405	12.393	6.947	2.702	1.141	17.300	13.5
Ni	192	0.430	41.340	11.102	10.000	9.307	6.151	4.495	1.513	47.000	4.29
Cu	285	2.000	314.000	69.419	68.000	55.014	42.935	6.715	1.607	28.000	24.35
Pb	269	7.000	857.570	80.614	52.720	55.844	103.763	26.861	4.636	17.000	5.6
Zn	285	2.100	394.000	74.452	70.000	63.288	39.957	15.102	2.403	67.000	38
As	287	4.000	199.950	37.985	29.060	28.924	31.101	6.227	2.203	4.800	1.3
Se	100	0.060	24.010	3.398	2.025	1.978	4.066	8.874	2.719	0.090	1.35
Sr	124	79.160	2174.340	409.236	342.460	353.075	269.041	16.293	3.271	320.000	502.5
Mo	75	0.040	37.000	5.300	2.630	2.352	7.530	6.726	2.619	1.100	0.65
Sb	142	0.590	49.290	7.999	4.265	4.551	9.649	6.246	2.398	0.400	-
Cd	130	0.010	2.900	0.325	0.215	0.195	0.423	20.077	4.003	0.090	-
Ba	124	251.000	3488.510	801.209	664.950	714.146	510.569	12.814	3.347	624.000	662.5
Hg	69	1.250	91.900	23.649	21.200	19.604	15.079	8.549	2.426	0.05	-
Sn	124	0.520	16.300	1.530	1.245	1.307	1.519	73.662	7.783	2.100	1.25
Th	124	1.270	17.470	7.248	6.910	6.635	2.975	0.578	0.729	10.500	5.4

\* Rudnick ve Gao 2010'a ait veri, Geo.Ort: Geometrik Ortalama, Std.Sap. Standart Sapma, Ref. D. referans değer

Major elementlerden sodyum (Na), magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve kalsiyum (Ca) elementlerinin konsantrasyonlarının referans değerleriyle uyumlu olduğu, potasyum (K) elementinin ise referans değerini (%1.34) aştığı tespit edilmiştir (%0,616-2,67). K elementi için sahadaki örnek alım noktalarına ait element konsantrasyonlarının Rudnick ve Gao (2010) tarafından önerilen referans değerle (%1.16) ve bölge için hesap edilen referans değerle (1.34 mg/kg) kıyaslaması yapıldığında, sahanın K elementince yer yer iki katına çıkan değerlere ulaştığı görülmüştür (Tablo 2). K elementi için medyan ve geometrik ortalamaları dikkate alındığında ise referans değerlerin bir miktar aşıldığı görülmektedir. K elementi için tespit edilen yüksek konsantrasyonların sahadaki etkin hidrotermal alterasyonla paralellik gösterdiği gözlenmiştir.

Ayrıca sahada toprak konsantrasyonlarının kıyaslaması iz element ve ağır metaller için de gerçekleştirilmiş ve her bir element için değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

Mangan (Mn) elementi litosferde rastlanan en bol elementlerdendir. Özellikle mafik kayalar yüksek konsantrasyonlarda Mn içerirler. Günlenme esnasında, Mn bileşikleri atmosferik koşullarda okside olur ve kayalardan serbestleşen Mn oksitler ortamda yeniden çökelir ve kolayca ikincil Mn minerallerini oluştururlar (Kabata-Pendias, 2011). Mn kolaylıkla hareketlenen bir elementtir. Soğuk iklimlerde günlenme zonlarından ve asidik solisyonlarla topraktan bikarbonat olarak veya organik asitlerle (bitkilerin bozuşmasından türeyen) kompleksler olarak yeniden hareketlenir. Tropikal iklimlerde ve yarı tropik iklimlerde bununla birlikte Mn sıklıkla konkresyon ve nodüller şeklinde değişik formlarda konsantre olurlar. Mn, toprakta oksitler ve hidroksitler şeklinde diğer toprak tanelerini kaplamış formlarda görülmektedir. Topraktaki Mn miktarı coğrafi olarak farklılıklar göstermekle birlikte Gümüşhane coğrafyasına da yakın olan eski Sovyetler birliğinde 217 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Kabata-Pendias, 2011). Bu çalışmada ise daha yüksek referans değeri elde edilmiştir (1084 mg/kg). Canca sahası topraklarında ise Mn değerleri 24 ile 2745 mg/kg gibi oldukça geniş aralıkta bulunmaktadır. Bölgedeki kayalarda yoğun olarak rastlanan Mn sıvımları bölgedeki kayalarda yüksek Mn değerlerinin varlığına işaret eder. Bununla birlikte saha topraklarına ait Mn elementinin medyan (525.57 ppm) ve geometrik ortalama (497.08 ppm) değerlerinin referans değerlerinin (770 ppm) altında kaldığı görülmüştür (Tablo 2). Bunda sahadaki günlenmenin etkisinin olduğu düşünülmektedir.

Demir (Fe) elementi litosferin ana unsurlarından olup, mafik magmatik kayaların neredeyse % 5'ini oluşturmaktadır. Karasal ortamlarda demirin jeokimyası çok karmaşıktır. Davranışlarını ortamın pH'sı doğrudan etkilemektedir. Oksitler ve hidroksitler şeklinde çökelimi yaygın olup, toprakta çoğunlukla da oksit ve hidroksitler şeklinde ya parçacıklar şeklinde veya diğer minerallerin yüzeyini kaplamış olarak bulunmaktadır. Topraklardaki demir içerikleri dikkate alındığında bazı örnek alım noktalarında 11.44 % değerlere kadar ulaştığı görülmektedir. Fe için medyan ve geometrik ortalama değerlerin (sırasıyla %4.56 ve %4.40) üst kabuk değerine (%3.53) göre yüksek olduğu, dolayısıyla sahanın demir açısından bir miktar zenginleşmiş olduğu görülmüştür.

Bizmut (Bi) yer kabuğunda yaklaşık ortalama 0.2 mg/kg konsantrasyona sahiptir (Kabata-Pendias, 2011). Topraktaki Bi içeriğine yönelik yapılmış çalışmalar sınırlı olup, topraktaki Bi'un kaynağının ana kayac olduğu kabul edilmektedir. Canca sahasında 40 örnek alım noktasında Bi dedeksiyon limiti üstünde tespit edilmiş olup, Rudnick ve Gao (2010) üst kabuk referans değerine (0.16 ppm) göre, sahadan ölçülen konsantrasyonlar oldukça yüksek olup, Sahadaki Bi'a ait gerek medyan gerekse geometrik ortalama değerlerinin üst kabuk referans değerlerini bir hayli aşmış olması dikkat çekicidir (Tablo 2). Canca sahasında ölçülen bu yüksek Bi konsantrasyonlarının, sahanın maruz kaldığı yoğun alterasyonu sebebiyle, yerli kayaktan ayrılarak toprakta meydana getirdiği zenginleşme kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

Skandiyum (Sc) elementi mafik kayalarda ve killi sedimentlerde nispeten daha yüksek konsantrasyonlara sahipken, kumtaşı ve kireçtaşlarında ise daha düşük konsantrasyonlarda ölçülmektedir. Sc genellikle demirli minerallerde, özellikle de biyotitlerde birlikte bulunur. Genel olarak topraklardaki Sc 0.5 ile 45 mg/kg arasında değişmektedir (Kabata-Pendias, 2011). Granitik ve volkanik kayalardan türemiş topraklarda Sc değerleri nispeten daha yüksek çıkmaktadır (Rollinson, 2014). Sc konsantrasyonunun topraktaki 5-10 mg/kg aralığındaki ortalamaları dikkat çekicidir (Kabata-Pendias, 2011). Çalışma sahasında Sc değerlerinin 2.7 ile 58.74 gibi geniş bir aralıkta değiştiği tespit edilmiş, olup, üst kabuk referans değeri (14 ppm) dikkate alındığında bu değerlerin ciddi manada yüksek olduğu görülmektedir. Saha için Sc'a ait eşik değerin 8 ppm olarak hesaplandığı göz önünde bulundurulduğunda Sc konsantrasyonlarının sahada dikkat çekici seviyede yüksek olduğu tespit edilmiştir (Tablo 2).

Vanadyum (V) daha çok mafik kayalarda ve şeyllerde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşmaktadır (100-250 mg/kg). Jeokimyasal davranış özellikleri oksidasyon durumuna (+2, +3, ve +5) ve ortamın asiditesine bağlıdır. Dolayısıyla pH-Eh V elementinin jeokimyasal davranışlarında belirleyicidir. Kendi minerallerinden ziyade başka mineraller içinde Fe, Ti ve Al'un yerini alarak kristal yapıları içinde iz olarak bulunmaktadır. Günlenme sürecinde V'un hareketliliği bulunduğu minerale de bağlıdır ve sonunda kayac oluşturan mineralin kalıntısında veya adsorbe olarak veya, killerin veya Fe oksitlerin mineral yapılarında birleşik olarak bulunmaktadır. V'un topraktaki davranışları çok dikkat çekmemiştir. Yüksek V konsantrasyonları mafik kayalardan türemiş topraklarda 150-460 mg/kg arasında değişirken, turba topraklarda ise 5 ile 22 mg/kg arasında değişmektedir. Örneğin Çin referans topraklarında V değerinin 37-100 mg/kg arasında değiştiği belirtilmektedir (Kabata-Pendias, 2011). Canca sahasındaki V konsantrasyonları ise 3.24-352.98 mg/kg aralığında değişmekte olup, medyan değeri 120.37 mg/kg olarak bulunmuştur (Tablo 2). Üst kabuk referans değeri 97 mg/kg olarak kabul edildiğinde (Rudnick & Gao, 2010), ortalama V konsantrasyonlarının referans değerleri aştığı görülmektedir (Tablo 2). Sahadaki andezitik ve bazaltik kayaların ferromagnezyen minerallerce zengin olduğu düşünüldüğünde, yüksek V konsantrasyonlarının bu minerallerin hidrotermal alterasyonlara bağlı olarak bozuşmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.



Krom (Cr) elementi ultramafik ve mafik kayalarda daha yüksek olup, % olarak ifade edilebilen konsantrasyonlara ulaşmaktadır. Asit magmatik ve sedimanter kayalarda ise Cr konsantrasyonunun 5-10 mg/kg aralığında olduğu rapor edilmektedir (Kabata-Pendias, 2011). En yüksek Cr değerleri killi sedimentlerde dir. Cr'un topraktaki davranışları toprak pH'sı ile ve redox potansiyeli ile doğrudan ilişkili olup, topraktaki kromun kaynağı ana kayadır. Bu yüzden mafik ve volkanik kayalardan türemiş topraklarda daha yüksek konsantrasyonlarda Cr'a rastlanır. Kabata-Pendias (Kabata-Pendias, 2011). tarafından yapılan Polonya Podzols kumlu topraklarda Cr değeri ortalama 51 mg/kg olarak rapor edilmiştir. Çalışma sahasındaki topraklardaki Cr konsantrasyonları ise üst kabuk değerlerinin 1.5 katından daha yüksek ölçülmüştür. Bu manada üst kabuğa göre sahada Cr elementince bir zenginleşme söz konusudur (Tablo 2). Sahadaki yüksek Cr'un kaynağının ana kayaçta bol miktarda bulunan mafik minerallerin bozulması olduğu düşünülmektedir.

Kobalt (Co) siderofil bir elementtir ve oksijen ve sülfür afinitesi düşüktür. Ortamda daha çok  $Co^{2+}$  ve  $Co^{3+}$  olarak görülmektedir. Bu özelliği Fe'e benzerlik gösterir. Kökensele olarak ferromagnezyon minerallerle birlikteliği yaygındır ve demiroksit ve hidroksitlerde demirin yerini alabilmektedir (Hooda, 2010). Co toprakta Fe ve Mn oksitlerle güçlü tutulur. Mineral yüzeyler ve organik madde tarafından emilimleri, çinko (Zn) ve nikel (Ni)'ne benzer şekilde pH ile azalır. Ortamın asitliği kobaltın çözünürlüğünü artırmakta diğer katyonlar gibi kolayca yıkanabilmektedir (Sposito, 2008). Kayalarda Co ortalama konsantrasyonu 25 mg/kg civarında rapor edilmiştir (Hooda, 2010). Böyle olmakla birlikte kayaç türlerine göre de değişiklik göstermektedir. Asidik kayalarda 0.1-20 mg/kg iken ultramafiklerde ise 100-200 mg/kg aralığında değişim göstermektedir. Kayalarda  $Co^{2+}$  olarak bulunmakta ve Ferrno magnezyen minerallerde Fe ve Mg elementleriyle izomorfizma göstermektedir (Kabata-Pendias, 2011). Topraklardaki kobalt konsantrasyonları ortalama 10-15 mg/kg aralığında değişmektedir. Üst kabuk konsantrasyonu 17.30 mg/kg olup (Rudnick & Gao, 2010), Canca sahasında ise 0.88 ppm ile 49.98 ppm aralığında ölçülmüştür (Tablo 2). Her ne kadar bazı örnek alım noktalarında Co yüksek konsantrasyonlara ulaşmış olsa da ortalama değerleri (13.41 ve 12.39 mg/kg, sırasıyla medyan ve geometrik ortalama) üst kabuk değerlerine göre düşük kalmıştır (Tablo 2). Saha genelindeki yüksek konsantrasyonların alterasyon şiddeti ile ilişkili olduğu görülmektedir.

Nikel (Ni) elementi +1, +2, +3 ve +4 oksidasyon koşullarında bulunur. Ni (II) toprakta geniş bir pH aralığı ve redoks koşullarında rastlanmaktadır (Hooda, 2010; Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Ni'in cevher olarak ana kaynağı lateritler olmakla birlikte magmatik sülfid yataklarında ise pentlandit mineralli şekilde görülmektedir. Kayalardaki ortalama Ni konsantrasyonu 75 mg/kg'dır (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011; McGrath, 1995). Bu değer bazaltik kayalarda 140 mg/kg iken granitik kayalarda ise 8 mg/kg olarak rapor edilmiştir (Kabata-Pendias, 2011). Ni de Cr gibi mafik ve ultra mafik kayalarda yüksek konsantrasyonlarda gözlenir. Dünya topraklarındaki ortalama değeri 20-40 mg/kg olarak verilmektedir. Bu değer bulunma aralığı olarak düşünüldüğünde ise 0.2-450 mg/kg gibi geniş bir aralık sunmaktadır (Kabata-Pendias, 2011). Canca sahasında Ni değerleri üst kabuk değerlerinin altında kalmıştır (0.43 ile 41.34 mg/kg aralığında, medyan değeri 10 mg/kg olup, üst kabuk konsantrasyonu 47.00 mg/kg'dır) (Tablo 2). Ni konsantrasyonlarının granitik kayalardaki ortalamasının nispeten düşük olduğu düşünüldüğünde ve sahada yüzeyleyen kayaların andezitik ve bazaltik kayalar olması nedeniyle saha topraklarında 41.34 mg/kg'a ulaşan Ni değerlerinin ana kayalardaki ferromagnezyen minerallerin hidrotermal alterasyona bağlı bozulması ile ilişkilendirilebilir.

Bakır (Cu) doğada +1 ve +2 oksidasyon koşullarında rastlanmakla birlikte en çok iki değerlikli (+2) katyonu bulunur, ancak Cu tek değerlikli katyonlar ve kompleks anyonlar şeklinde de oluşabilmektedir (Hooda, 2010). Cu litosferde bolluk olarak 26. sıradadır (ortalama 70 mg/kg). Üst kabuktaki konsantrasyonu ise 24-55 mg/kg aralığındadır, toprakta ise 13-24 mg/kg aralığında Cu konsantrasyonları rapor edilmektedir (Hooda, 2010). Bazik kayalarda bakır içeriği 30-160 mg/kg aralığında iken asidik kayalarda ise 4-30 mg/kg aralığında rapor edilmektedir (Hooda, 2010). Bakır toprakta kil minerallerince, demir ve manganez oksitlerle ve organik materyallerle güçlü şekilde absorbe olurlar. Canca sahası topraklarında Cu konsantrasyonları 2.00-314 mg/kg gibi geniş aralıkta ölçülmüşlerdir (Tablo 2). Bu değerler Rudnick ve Gao (2010) tarafından önerilen ortalama üst kabuk Cu değeri (28 mg/kg) ile kıyaslandığında sahada bazı örnek alım noktalarında bakır değerlerinin bu değeri çok aştığı, Cu'a ait ortalama değerleriyle de kıyaslandığında ise (Tablo 2) saha için yaklaşık 2 kat yüksek Cu konsantrasyonu tespit edilmiştir.

Kurşun (Pb) elementi Pb(II) ve Pb(IV) oksidasyon koşullarında stabildir. Ancak çevre jeokimyası açısından değerlendirildiğinde  $Pb^{2+}$  değerlikli olan baskındır. Pb elementi ana çevre kirleticilerindedir. Genel olarak Pb kayaç ve topraklarda iz miktarda bulunur. Yüzey ortamlarında kurşunun doğal kaynağı jeolojik materyallerin günlenmesinden kaynaklıdır. Bununla birlikte atmosfere yayılımı ise volkanlardan, rüzgarla savrulan tozlardan, deniz üfleçlerinden, biyojenik malzeme ve orman yangınlarından kaynaklı olmaktadır. Kayaç türlerinde de Pb konsantrasyonu farklılık göstermektedir. Ultramafik kayalarda 1 mg/kg ortalama Pb konsantrasyonu söz konusu iken bazaltik kayalarda 6 mg/kg, granitik kayalarda ise 18 mg/kg ortalama değerler rapor edilmektedir (Hooda, 2010). Çalışma sahası topraklarında Pb konsantrasyonları homojen bir dağılım

göstermemektedir (7-857.57 mg/kg) (Tablo 2). Pb ortalama değeri ise (sırasıyla medyan ve geometrik ortalama) 52.72 - 55.84 mg/kg'dır. Bu değerler üst kabuk değerini hayli aşmaktadır.

Çinko (Zn), kadmiyum (Cd), ve civa (Hg) gibi 12. grup elementler içinde bulunur. Zn'nun ortalama kabuk içeriği 70 mg/kg rapor edilmektedir, bu değer dünya toprakları için de ortalama değer olarak önerilmektedir (Kabata-Pendias, 2011). Günlenme süreçlerinde mobildir ve kolay çözünürlüğü bileşikleri karbonatlarda kolayca çökelebilmektedir. Çinko elementi bakır ve molibden gibi bitki ve hayvanlar için temel elementlerdendir. Doğada rastlanan yaygın Zn mineralleri sfalerit, wurzit, simitsonit gibi minerallerdir (Kabata-Pendias, 2011). Topraktaki çinko içerikleri köken kayalarından ziyade diğer pedojenik faktörlerce de kontrol edilmektedir (Hooda, 2010). Silisli asidik kayalardan türeyen topraklar Zn elementince fakirken, bazik magmatik kayalar, kireçtaşları ise nispeten daha yüksek Zn içeriği gösterir. Avrupa ülkelerindeki toprakların çinko içerikleri 7-89 mg/kg aralığındadır. Canca sahası topraklarında Zn konsantrasyonları 2.1-394 mg/kg aralığında olup, sırasıyla 70 ve 63.29 mg/kg medyan ve geometrik ortalama değeri hesap edilmiştir. Sahada Zn konsantrasyonları yer yer ortalama toprak değerlerini aşmış olmakla birlikte ortalama değerler açısından üst kabuk değerinden düşük kalmaktadır. Bu değerler yine de Avrupa topraklarının ortalama üst sınırına yakın değerlerde olduğu da görülmektedir. Genel toprak özellikleri düşünüldüğünde sahadaki yüksek Zn konsantrasyonlarının andezitik ve bazik kayaların hidrotermal alterasyona bağlı bozuşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kadmium (Cd) insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri bilinen elementlerin başında gelir ve en ekotoksik elementlerdendir. Dünya kabuğundaki ortalaması 0.1 mg/kg'dır. Cd elementi Zn ve Pb elementi ile birlikteliği yaygındır. Bu manada sfalerit içinde, ayrıca biyotit ve amfibollerde de, özellikle de simitsonit mineraline rastlanır. İyonik yapısı ve elektronegativitesi Zn'ya benzediği için Zn ile ortak kimyasal özellikler sergilerler. Dünya ortalama toprak kadmiyum içeriği 0.41 mg/kg olarak tahmin edilmektedir. Canca sahasında ise kadmiyum konsantrasyonu 0.01 ile 2.90 mg/kg aralığında olup, medyan değeri 0.22, geometrik ortalaması ise 0.20 mg/kg olarak bulunmuştur. Bu değerler Rudnick ve Gao (2010) üst kabuk değerlerinden 2 kattan fazla bir zenginleşmeye karşılık gelmektedir (Tablo 2).

Arsenik (As) periyodik cetvelde 15 gruba olup, kalkofil elementlerdendir. Antimon (Sb) ile de birçok benzer biyojeokimyasal özellikler göstermektedir. Toprakta ve sucul ortamlarda inorganik As çoğunlukla oksidasyon durumlarında iki halde (+3 ve +5) bulunur (Hooda, 2010). As ilksel olarak, özellikle de alkali topraklarda, oksik koşullarda anyonlar, arsenat (As(V)), indirgen koşullarda ise arsenit (As(III)) şeklinde bulunurlar (Huang & Matzner, 2007). As elementi, Fe ve Al oksitlerle çözünmeyen bileşikler oluşturabilir, kil mineralleri üzerindeki organik madde veya hidroksil gruplarına adsorbe olabilir ve bu bölgelerden de fosfatlı gübreler tarafından desorbe edilebilir (Huang & Matzner, 2007). Toprak ve su ortamlarındaki As ve Sb, yerli kaynaklardan (örneğin mineral ayrışması) ve antropojenik girdilerden kaynaklanır. Kirlenmemiş topraklardaki ortalama toplam arsenik içeriği yaklaşık 5 mg/kg olarak rapor edilmiştir (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011). Volkanik topraklarda bu miktar 20 mg/kg'a kadar çıkabilmektedir. Canca sahasında arsenik konsantrasyonu 4-199.50 mg/kg gibi geniş aralıkta değişmektedir. Saha için medyan değeri 29.06, geometrik ortalaması ise 28.92 mg/kg olarak tespit edilmiş olup, volkanik kayalardan türemiş topraklardaki ortalama değeri aşmaktadır. Arsenik için üst kabuk referans değeri dikkate alındığında ise (4.80 mg/kg), sahadaki toprakların ortalama içeriğin neredeyse 5 kat daha fazladır. Saha için hesaplanmış referans değer baz alındığında ise (1.30 mg/kg) sahadaki arsenik değerinin dikkat çekici derece yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 2). Sahanın yoğun alterasyonla bağlı olarak kil içeriklerinin ve hidroksil içeriğinin fazlalığı düşünüldüğünde As konsantrasyonlarının yüksekliği beklenen bir durum olarak görülmektedir.

Selenyum (Se) periyodik tablonun 7. grubu içindedir. Elementel olarak doğada az rastlanır. Selenyum elementinin eksiklik ve toksisite aralığı ise oldukça dardır. Kimyasal olarak tellürüyum ve sülfür elementlerine de çok benzerlik göstermektedir. Redoks koşullarına duyarlıdır ve ortamlarda değişik oksidasyon durumlarında rastlanır (-2 den +6'ya). Se topraklarda az aranda bulunur (<10 mg/kg), 1 mg/kg'dan yüksek konsantrasyonlardaki topraklar selenyumlu topraklar olarak adlandırılır. Topraktaki selenyum içerikleri ana kayaç ve ortamın su rejimi ile yakın ilişki göstermektedir. Düşük konsantrasyonlar, granit gibi magmatik kayalardan türemiş genellikle aşırı günlenmiş asidik topraklardadır. Topraklardaki Se konsantrasyonu geniş bir aralıkta rastlanmaktadır (<0.005 ile >20 mg/kg). Çoğu tarım topraklarında ise ortalama 0.2 mg/kg'dır. Yüzey topraklarında ise ortalama 0.33 mg/kg olarak rapor edilmiştir (Hooda, 2010). Canca sahasında Se değeri 0.06 ile 24.01 mg/kg aralığında ölçülmüştür. Medyan ve ortalama değeri ise sırasıyla 2.03 ve 1.98 mg/kg'dır. Bu değerler dünya yüzey topraklarına yakın değerler olup, Rudnick ve Gao (2010) tarafından önerilen üst kabuk değerine göre (0.09) ve bölge referans değerine göre (1.35 mg/kg) yüksek olarak tespit edilmiştir. Yüksek değerler özellikle yoğun fillik alterasyonların olduğu kesimlere denk gelmektedir. Bu ise Se zenginleşmesinde hidrotermal alterasyon etkin olduğunu göstermektedir.

Stronsiyum (Sr) yer kabuğunda nispeten yaygın rastlanan bir elementtir. Sr kalsiyumla kimyasal ve jeokimyasal benzerlikler sunar (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011). Mg ile benzerliği Ca'a nispeten daha düşüktür. Yer kabuğundaki içeriği 260 ile 370 mg/kg aralığındadır. Çoğunlukla da mafik magmatik kayalar ve kalkerli sedimentlerde daha yüksek konsantrasyonlardadır. Killer stronsiyumu geniş bir absorbe kapasitesine sahiptir. Jeolojik Sr oluşumları çoğunlukla kalkerli kayalar ve sülfürlü maden yatakları ile ilişkilidir. Dünya topraklarındaki Sr referans değeri 130-240 mg/kg olarak rapor edilmektedir (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011). Günlenme süreçlerinde, özellikle de okside asidik ortamlarda, Sr kolayca hareketlenmektedir. Ca/Sr oranı biyosferde genellikle stabildir ve bu oran 8'den düşük ise muhtemel Sr toksisitesini gösterir. Canca hidrotermal alterasyon sahası topraklarındaki Sr konsantrasyonu 79.16 ile 2174.34 mg/kg aralığında değişmekte olup, medyan ve geometrik ortalama değerleri 342.46 ve 353.08 mg/kg'dır. Üst kabuk değerine göre (320 mg/kg) Sr değerleri yüksek olup, bölgenin referans değerine göre (502.5 mg/kg) ise düşüktür. Ancak sahanın geneli dikkate alındığında ise bazı örnek alım noktalarının Sr içeriğinin bölgenin referans değerlerini de aştığı görülmektedir (Tablo 2). Sahadaki Sr konsantrasyonunun kaynağının ana kayalardaki feldispat minerallerinin bozuşması olarak görülmüştür ki bu da Sr konsantrasyon artışında hidrotermal alterasyonun etkisine işaret etmektedir.

Molibden (Mo), gümüş (Ag), talyum (Tl) ve vanadyum (V) elementleri gibi potansiyel toksik özellik gösteren elementlerdendir. Bununla birlikte bitki ve hayvanların büyümesi ve gelişimi için de esas elementlerin içindedir. Mo baskın olarak Mo (VI) olarak bulunur fakat oksidasyon durumunda Mo (IV) olarak görülür. Molibden feldispatlarda ve ferromagnezyen minerallerde rastlanır, Fe<sup>3+</sup>, Ti<sup>4+</sup> ve Al<sup>3+</sup>'ün yerini alması, hatta Si<sup>4+</sup>'ün yerini alması olasıdır (Hooda, 2010). Topraklardaki Mo konsantrasyonu 0.013 ile 17.0 mg/kg aralığında gözlenmekte olup, toprak ortalaması ise 1.8 mg/kg'dır (Kabata-Pendias, 2011). Çalışma sahasında Mo konsantrasyonları 0.04 ile 37.00 mg/kg aralığında olup, medyan ve geometrik ortalaması ise sırasıyla 2.63 ve 2.35 mg/kg'dır. Bu değerler üst kabuk (1.10 mg/kg) ve bölgesel referans değerini (1.35 mg/kg) hayli aşmaktadır (Tablo 2). Yüksek Mo konsantrasyonlarının bazaltik, andezitik kayalardaki feldispat ve ferromagnezyen minerallerin hidrotermal alterasyon süreçlerine ile bozuşmasına bağlanmıştır.

Antimon (Sb) kalkofil elementlerden olup, arsenik gibi periyodik tabloda 15. Grup içindedir. Düşük sıcaklıklı ortamlarda en yaygın oksidasyon durumları +5 ve +3'tür. Jeotermal ortamlarda ise antimon, altın ve sülfür ile birliktelik gösterir. Topraklardaki ortalama Sb konsantrasyonu yaklaşık 1 µg/kg rapor edilmiştir (Hooda, 2010) ancak yaygın kabul ise 0.25 ile 1.04 mg/kg aralığı çoğu topraklar için geçerli olup, ortalama konsantrasyon ise 0.67 mg/kg'dır (Kabata-Pendias, 2011). Jeolojik ortamlar için Sb'a yönelik çalışmalar çok fazla olmayıp, son zamanlarda bu tür çalışmalarda artış görülmektedir (Sungur et al., 2020; Vural et al., 2020). Yer kabuğu için verilen Sb ortalama değeri 0.2 mg/kg'dır (Kabata-Pendias, 2011). Sb arsenikle olduğu gibi Bi ile de bir miktar kimyasal davranış benzerliği gösterir. Genellikle +3 yüklü olmakla birlikte az da olsa +5 değerlikli Sb da görülmektedir ve antimon amfoterik bir davranış gösterir. Sb'un reaksiyonları günlenme süreçlerinde yeterince bilinmemekle birlikte, genellikle çözülebilir formlarda oluşurlar. Sb kolaylıkla absorbe olabilir bu yüzden de killi sedimentlerde ve sulu oksitlerde zenginleşme eğilimi yüksektir. Çalışma sahasındaki toprakların Sb konsantrasyonları ise 0.59 ile 49.29 mg/kg aralığında olup, medyan ve geometrik ortalama değerleri sırasıyla 4.27 ve 4.55 mg/kg'dır. Bu ortalama değerler üst kabuk değerine (0.4 mg/kg) göre 10 kattan fazla bir zenginleşme anlamına gelmektedir (Tablo 2). Sb elementinin genel jeokimyasal özellikleri düşünüldüğünde sahadaki yüksek Sb konsantrasyonunun doğrudan alterasyon ile ilişkili olduğu söylenebilir.

Baryum (Ba) yaygın ve oldukça bol rastlanan bir element olup, yer kabuğundaki ortalama içeriği 400 mg/kg, üst kıta kabuğunda ise 250 ile 584 mg/kg arasında değiştiği rapor edilmiştir (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011). Ba litofil yatkinliğe sahiptir ve asid magmatik ve sedimanter kayalarda bol olarak rastlanmakta olup, bunlardaki konsantrasyon aralığı 50-1200 mg/kg'dır. İyonik yarıçapının yakınlığı nedeniyle jeokimyasal süreçlerde K ile benzerlikler sunar. Günlenme esnasında mobil değildir, çünkü sülfat ve karbonatlarla kolaylıkla çökelir ve killerce kolayca absorbe edilme özelliğine sahiptir. Topraklarda 10 ile 1500 mg/kg aralığında olup, organiklerde en düşük, tınlı topraklarda ise en yüksektir. Topraklarda ortalama aralığı 362-580 mg/kg'dır (Kabata-Pendias, 2011). Canca sahasında 251 ile 3488 mg/kg aralığında değişen konsantrasyonlarda Ba'a rastlanmıştır. Ba'un medyan ve geometrik ortalamaları ise sırasıyla 664.95 ve 714.15 mg/kg'dır. Bu değerler toprak ortalamalarının üstündedir ve üst kabuk konsantrasyonunu da aşmaktadır. Medyan ve geometrik ortalama değerlerinin bölgesel referans değerini de aştığı görülmektedir.

Civa (Hg) periyodik tabloda 12. grupta Zn ve Cd ile birlikte yer alır. Hg bitki ve hayvanlar için temel elementlerden olmayıp, toksik bir elementtir. Doğal ortamlarda saf metalik Hg yanında gaz ve katı hallerde, +2 değerlikli (Hg<sup>+2</sup> ve Hg<sub>2</sub><sup>+2</sup> şeklinde) olarak görülmektedir. Hg aynı zamanda kayalarda iz miktarda bulunmaktadır (genellikle <0.05 mg/kg). Civanın antropojenik faaliyet kaynaklı yaygın yayılımı, civanın küresel biyojeokimyasal döngüsü üzerine eder (Mason et al., 1994). Ana civa minerali olan zinobar, yüksek oranda çözünmezdir; toprak bileşenlerini emmeye yönelik güçlü eğilim ile birlikte, bu, civanın topraklarda nispeten hareketsiz olmasına

neden olur (Kabata-Pendias, 2011). Civanın topraktaki kimyasal davranışı pH, Eh ve organik madde tarafından kontrol edilmektedir. Örneğin asidik pH ve Eh'in 0.4 V'tan büyük olduğu durumlarda stabil formda bulunur. Bununla birlikte serbest civa toprakta aşırı mobil durumdadır. Canca sahasında civa konsantrasyonları 1.25 ile 91.90 µg/kg aralığında ve sırasıyla 21.20 ve 19.60 µg/kg medyan ve geometrik ortalamaya sahiptir. Üst kabuk değeri (0.05-0.07 mg/kg) (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011) ile kıyaslandığında sahadaki Hg konsantrasyonların aşırı yüksek olduğu görülmektedir. Dünya topraklarındaki 0.58-1.8 mg/kg değerleri (ortalama 1.1 µg/kg) ((Kabata-Pendias, 2011) dikkate alındığında da sahadaki örnek alım noktalarının yüksek Hg konsantrasyonlarına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 2).

Kalay (Sn) periyodik tabloda karbon (C), silis (Si), germanyum (Ge) ve Pb ile birlikte 14. grupta yer alır. Doğada +2 ve +4 oksidasyon durumlarında bulunur ve ikisi de stabildir. +2 değerlikli olan metalik, +4 değerlikli olan ise amfoterik özellikler göstermektedir. Sn hem bitki hem de hayvanlar için esas elementlerden değildir ve toksiktir. Minerallerde iz miktarda bulunur ve daha yüksek konsantrasyonlar belli cevher mineralleri içindedir. Silikatlarda az bulunması nedeniyle ortalama kabuk konsantrasyonu yaklaşık 2-2.5 mg/kg'dır (Hooda, 2010; Kabata-Pendias, 2011). Kayaçların bazik-asit türlerinde önemli bir konsantrasyon farklılığı görülmemektedir. Sadece killi sedimentlerde 6-10 mg/kg konsantrasyonlarda görülür ki bu da kalayın siderofil olarak kabulünü gerektirir. Hareketliliği pH'la kontrol edilmekle birlikte, günlenmeye karşı dirençlidir. Hareketsiz karakterde olduğu için toprakta zenginleşme eğilimi hakimdir, özellikle de Fe- ve Al- 'ca zengin yoğun günlenmenin olduğu topraklarda (Hooda, 2010). Topraklardaki ortalama konsantrasyonu kabuk değerlerine yakın olup, 2.5 mg/kg'dır. Canca sahasında Sn konsantrasyonları 0.52 ile 16.30 mg/kg aralığında ölçülmüş olup, sırasıyla 1.25 ve 1.31 mg/kg medyan ve geometrik ortalamaya sahiptir. Çalışma sahasında yer yer toprak ve üst kabuk değerlerini geçen konsantrasyonlarda Sn tespit edilmiş olsa da bölgedeki örnek alım noktalarındaki kalay konsantrasyonlarının ortalaması (medyan ve/veya geometrik ortalama) topraktaki ortalama değerlerin altında kalmaktadır. Bölgesel referans değerine göre ise yakın değerdedir (Tablo 2).

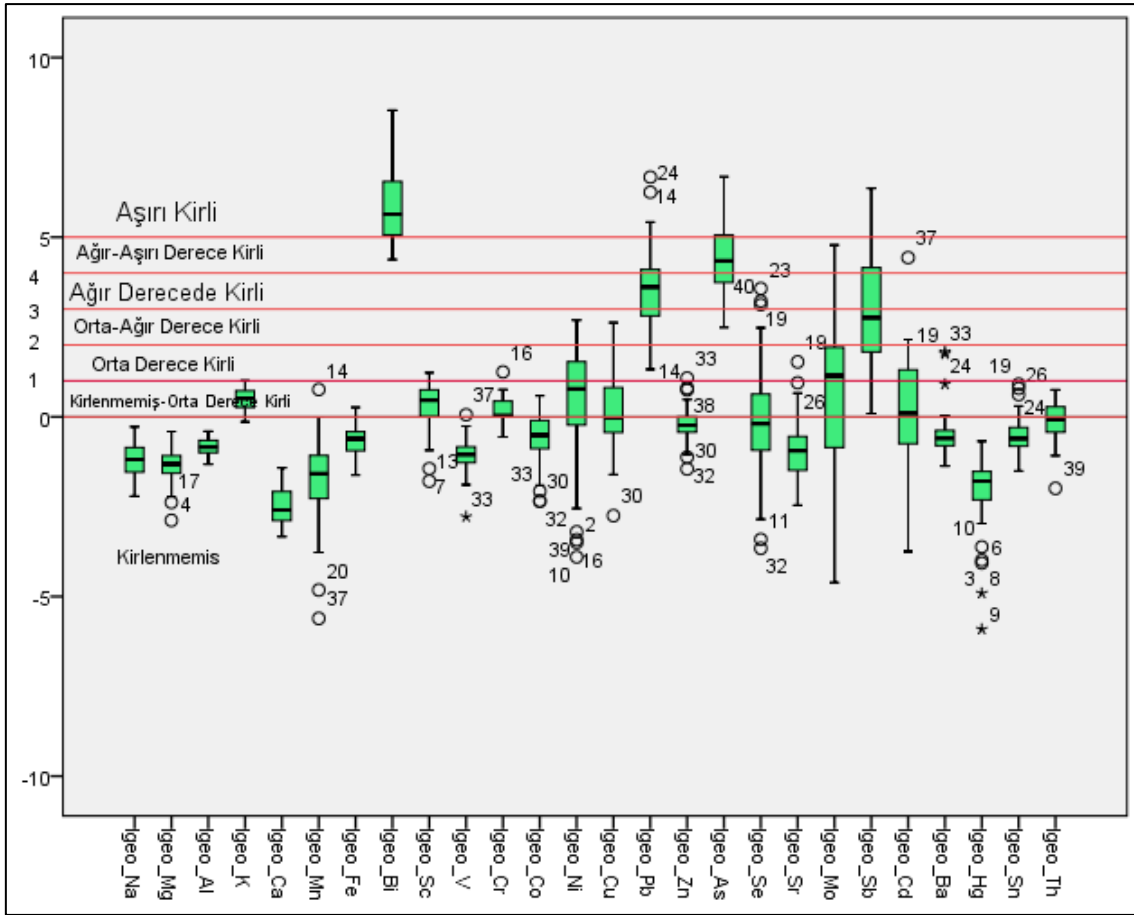
Toryum (Th) elementinin kirlenmemiş topraklardaki konsantrasyonu 8.1-11 mg/kg aralığında olarak rapor edilmiştir (Kabata-Pendias, 2011). Toryumun hareketliliği günlenme sırasında önemli oranda içinde bulunduğu minerale bağlıdır. Hareketlendiğinde çabucak hidrozilatlar olarak çökeler ve absorbe olur ve organik kompleksler ve oksitler, karbonatlar, fosfatlar, vanatlar ve arsenatlar gibi değişik stabil bileşikler oluşturur. Oksijen lijanları ile (diğer aktinidler gibi) kolayca güçlü kompleksler oluştururlar, böylece onun OH<sup>-</sup>, CO<sup>2-3</sup>, HPO<sup>2-4</sup> gibi inorganik lijan türleri ile kolayca değişik ortam koşullarında ortaya çıkması olağandır. Th, Eh-pH sistemi tarafından güçlü şekilde kontrol edilmektedir. Canca sahası Th konsantrasyonları 1.27 ile 17.47 mg/kg aralığında değişmekte olup, medyan ve geometrik ortalama değeri sırasıyla 6.90 ve 6.64 mg/kg'dır. Üst kabuk değeri ile kıyaslandığında her ne kadar bazı örnek alım noktalarında bu değer aşılmış olsa da medyan ve ortalama değerlerinin üst kabuk değerinin altında olduğu görülmüştür. Bölgesel referans değeri ile kıyaslandığında ise medyan ve geometrik ortalama değerlerinin bölgesel referans değerini aştığı görülmektedir (Tablo 2).

### 3.2. Sahanın kirlilik parametreleri ile değerlendirilmesi

Canca sahası topraklarında element konsantrasyonlarına ait hesaplanan  $I_{geo}$  parametreleri dikkate alındığında Na, Mg, Al, Ca, Mn, Fe, V, Co, Zn, Sr, Ba, Hg, Sn elementlerince sahanın genelinde kirlilik olmadığı görülmektedir ( $I_{geo} \leq 0$ , sınıf 1) (Şekil 3). K, Sc, Cr ve Th elementlerinin  $I_{geo}$  parametresine göre, kirlenmemiş-orta derece kirli sınıfına düştüğü ( $I_{geo} \leq 0$  ve  $0 < I_{geo} < 1$ ), sadece bazı örnek alım noktalarında ise orta kirli sınıfında olduğu ( $1 < I_{geo} < 2$ , sınıf 2) tespit edilmiştir. Saha elementler bazında  $I_{geo}$  parametresi açısından değerlendirildiğinde; Al'ca 38, K'ca 58, Fe'ce 27 ve Zn'ca 26 örnek alım noktasında orta derecede kirlilik olduğu, Cr açısından 74 örnek alım noktasının orta derece kirli, 4 örnek alım noktasında ise yüksek derecede kirli sınıfında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3) Mn elementi açısından saha ele alındığında ise 48 örnek alım noktasında orta derecede, 76 örnek alım noktasında yüksek derecede kirlilik olduğu görülmüştür.

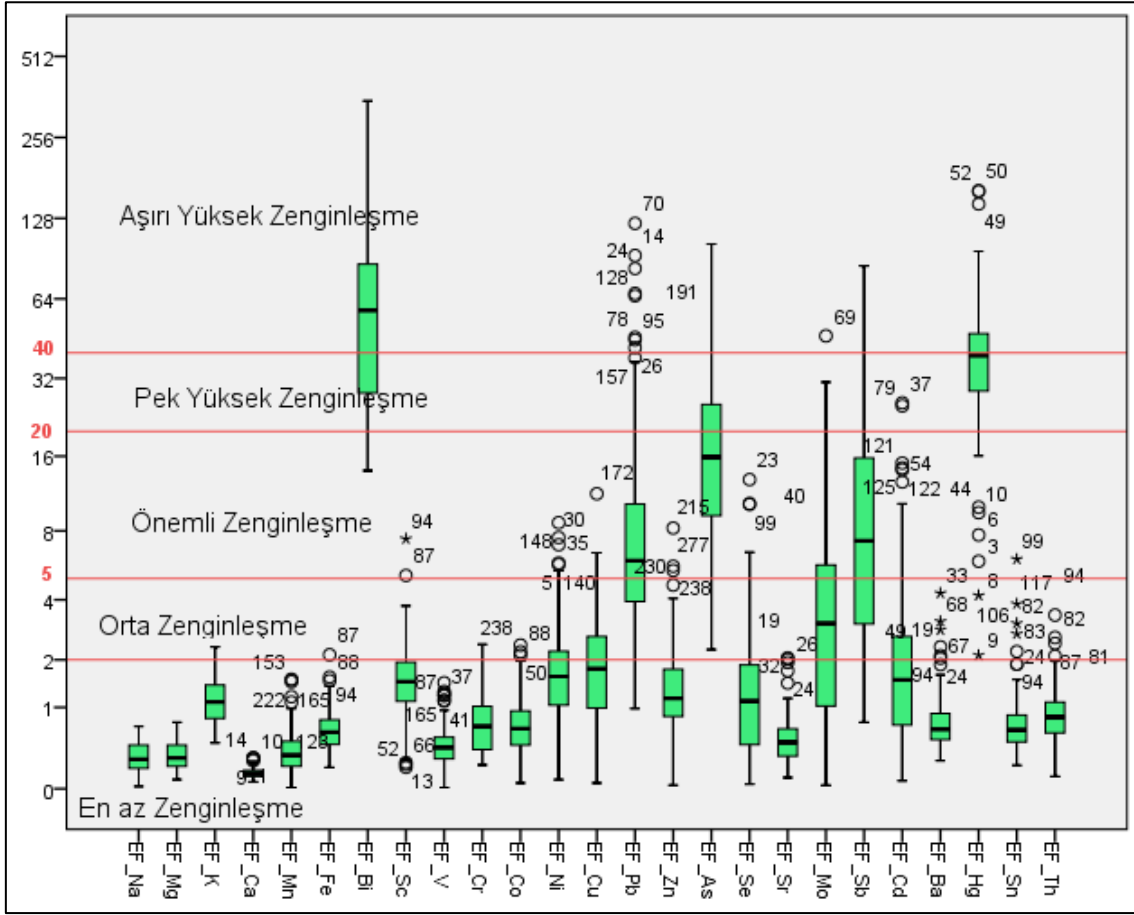
Saha Co açısından  $I_{geo}$  parametresi ile değerlendirildiğinde 66 örnek alım noktasının orta derece kirlilik sınıfında olduğu ve 12 örnek alım noktasında ise yüksek derecede kirliliğin olduğu tespit edilmiştir. Mo elementi açısından  $I_{geo}$  parametresi ile yapılan değerlendirme ise sahada 52 örnek alım noktasının orta derecede kirli, 81 örnek alım noktasının ise yüksek derecede kirli sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Cu açısından ise saha 56 örnek alım noktasında orta derecede kirli, 32 örnek alım noktasında ise yüksek derecede kirli sınıfına düşmektedir. Pb elementi için  $I_{geo}$  parametresi açısından saha değerlendirildiğinde, 37 örnek alım noktasının orta derecede kirliliğe sahip olduğu, 1 örnek alım noktasının ise yüksek derecede kirlilik sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Arsenik açısından saha değerlendirildiğinde  $I_{geo}$  parametresi ile değerlendirildiğinde 19 örnek alım noktası orta derecede kirli sınıfına düşerken, 123 örnek alım noktasının ise yüksek derecede kirliliğe sahip görülmüştür. Canca sahası Cd açısından ise 14 örnek alım noktasının orta derecede kirli, 126 örnek alım noktasının ise yüksek derecede kirli sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Bi elementlerinin  $I_{geo}$  değerleri dikkate alındığında, sahada dedeksiyon limitinin üstünde tespit edilen 40 örnek alım noktasından 6 örnek alım noktasının ağır-aşırı kirli

sınıfında yer aldığı, kalan örnek alım noktalarının ise aşırı kirli sınıfa düştüğü tespit edilmiştir. Kutu diyagramında da Bi elementinin ağır-aşırı kirli, aşırı kirli sınıfa düştüğü görülmektedir (Şekil 3).



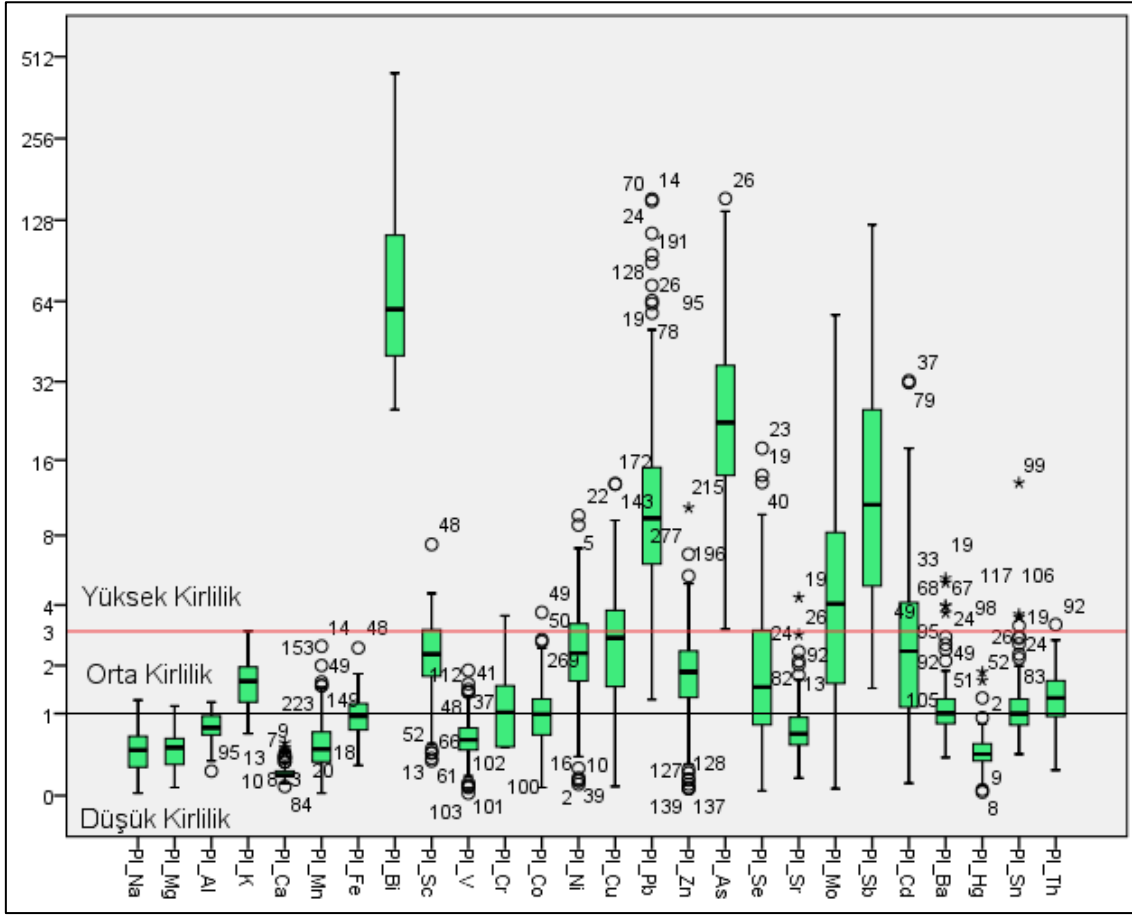
Şekil 3. İncelenen elementler için Canca sahası  $I_{geo}$  parametrelerine ait kutu diyagramları (kırmızı çizgiler kirlilik sınıflarını ayırmaktadır).

Saha Zenginleşme Faktörü (EF) açısından incelendiğinde; Na, Mg, K, Ca, Mn, Fe, V, Sc, Cr, Co, Zn, Sr, Ba, Sn, Th elementlerince sahada çok az bir zenginleşmenin olduğu tespit edilmiş olup, K, Fe, Sc, Cr, Co, Zn, Se, Ba, Sn, Th elementlerinin ise bazı örnek alım noktalarında Orta Zenginleşmiş sınıfa, çok çok az bir kısmının ise Önemli Zenginleşme sınıfına düştükleri tespit edilmiştir. Bi elementinin EF parametresine göre ağırlıklı olarak Aşırı Yüksek Zenginleşme Sınıfında olduğu, bir kısmının ise Pek Yüksek Zenginleşme Sınıfı içinde kaldığı görülmüştür. Ni, Cu elementinin EF'ye göre zenginleşmeleri, En Az Zenginleşme ve Önemli Zenginleşme Sınıf aralığı içinde yer aldığı görülmüştür. Pb, As ve Hg elementlerinin EF'ye göre çoğunlukla Orta Zenginleşme ile Pek Yüksek Zenginleşme Sınıf aralığı içinde olduğu, az sayıda örnek alım noktasının ise Aşırı Yüksek Zenginleşme Sınıfı içine düştüğü görülmüştür. Sb elementinin sahada EF açısından tüm sınıflara karşılık gelen örnek alım noktalarına sahip olduğu görülmüş olup, örnek alım noktalarının çoğunluğunun Orta Zenginleşme ve Önemli Zenginleşme Sınıfı içinde yer almaktadır (Şekil 4).



**Şekil 4.** İncelenen elementler için Canca sahası EF parametrelerine ait kutu diyagramları (kırmızı çizgiler zenginleşme sınıflarını ayırmaktadır).

Saha kirlilik indeksi PI açısından değerlendirildiğinde; Na, Mg, Al, Ca, Mn, V, Sr ve Hg elementlerince çoğu örnek alım noktası için Düşük Kirlilik Sınıfı'na düştüğü, çok az örnek alım noktasında ise Orta Kirlilik Sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir. Hg bu manada bir değişkenlik göstermekte az sayıda da olsa bazı örnek alım noktaları Yüksek Kirlilik Sınıfı içinde yer almaktadır. Sahadaki örnek alım noktalarının çoğunluğunda K, Sc, Zn ve Th elementlerince Orta Kirlilik Sınıfı içinde yer aldığı ancak bazı örnek alım noktalarının ise Düşük ve Yüksek Kirlilik Sınıflarında olduğu tespit edilmiştir. Cr, Co, Ba ve Sn elementlerinin çoğunluklu olarak Düşük ve Orta Kirlilik Sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir. Sahadaki örnek alım noktaları için Ni, Cu, Mo ve Cd elementlerinin ise çoğunluklu olarak Orta ve Yüksek Kirlilik Sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir. Bi, Pb, As ve Sb elementlerinin ise Yüksek Kirlilik Sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. İncelenen elementler için Canca sahası PI parametrelerine ait kutu diyagramları (kırmızı çizgiler kirlilik sınıflarını ayırmaktadır).

Sahadaki her bir örnek alım noktası için tüm elementlerin kirlilik indekslerin (PI) geometrik ortalaması alınarak her bir noktanın Birleştirilmiş Kirlilik İndeksi hesaplanmaktadır. Çalışma sahası için IPI hesaplanmasında birbirine yakın örnek alım noktaları bir nokta olarak kabul edilerek hesaplama yapılmıştır. Bu şekilde toplam inceleme noktası 150 adet olarak belirlenmiş ve hesaplama bu 150 nokta için yapılmıştır.

IPI hesaplamasında her bir örnek alım noktası için major elementler dahil edilerek (Na, Mg, Al, K ve Ca) ve hariç tutularak iki ayrı IPI (sırasıyla  $IPI_m$  ve  $IPI_e$ ) parametresi hesap edilmiştir. Major elementlerin dahil edildiğindeki örnek alım noktalarının  $IPI_m$  parametreleri, major elementsiz hesap edilen  $IPI_e$ 'lere göre nispeten daha düşük çıkmıştır. Major elementler dikkate alınarak hesaplanan  $IPI_m$  değerleri dikkate alındığında Canca sahasına ait örnek alım noktalarının 10 tanesinin Düşük Kirlilik Sınıfında olduğu, 106 örnek alım noktasının Orta Kirlilik Sınıfında ve 34 örnek alım noktasının ise Yüksek Kirlilik Sınıfında olduğu tespit edilmiştir.  $IPI_e$  parametresi dikkate alındığında ise sadece 3 örnek alım noktasının Düşük Kirlilik sınıfında olduğu, 69 örnek alım noktasının Orta Kirlilik Sınıfında olduğu, sahanın ekserisinin ise (79 örnek alım noktası) Yüksek Kirlilik Sınıfına düştüğü görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar

Yoğun hidrotermal alterasyon gelişimin olduğu Canca (Gümüşhane-Türkiye) sahası gömülü maden yatakları için potansiyel bir arama sahası olmasının yanı sıra, hidrotermal alterasyona bağlı olarak element zenginleşmesinin de olması beklenen bir sahadır. Sahayla ilgili maden arama çalışmalarının yanı sıra, bu element zenginleşmelerinin çevresel bir risk oluşturup oluşturmadığı bu çalışmayla  $I_{geo}$ , EF, PI ve IPI gibi değişik kirlilik parametreleri ile araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda genel manada değerlendirildiğinde major elementlerden Na, Mg, Al ve Ca elementlerinin konsantrasyonlarının yerel ve bölgesel referans değerlerine yakın seviye olduğu, K elementinin ise bahse konu referans değerlerini aştığı görülmüştür. Saha iz element ve ağır metaller açısından değerlendirildiğinde ise Fe, Bi, V, Cr, Cu, Pb, Cd, As, Sr, Sb, Ba, Hg ve Th elementlerinin ortalama değerlerinin referans değerlerini değişen oranlarda aştığı tespit edilmiştir. Sahaya ait element içerikleri kirlilik parametreleri açısından irdelendiğinde; Al, Th, Fe, Zn, Cr, Mn, Co, Mo, Cu, Bi ve Pb elementlerinin  $I_{geo}$  parametresine göre bazı örnek alım noktalarında Orta Derece Kirli ile Ağır Aşırı Derece Kirli sınıfları içinde değişik oranlarda kirlilik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Saha EF parametresine göre değerlendirildiğinde ise K, Fe, Sc, Cr, Co,

Zn, Se, Ba, Sn ve Th elementlerince sahadaki örnek alım noktalarının ağırlıklı olarak Orta Zenginleşme ve Önemli Zenginleşme Sınıfı içinde oldukları tespit edilmiştir. Pb, As, Sb, Bi ve Hg elementlerince ise Orta Zenginleşme ile Aşırı Zenginleşme Sınıfı aralığında bir zenginleşme tespit edilmiştir. PI parametresine göre ise K ve iz elementlerin çoğunluğun değişen miktarlarda Orta ve Yüksek Kirlilik Sınıfı içine düştüğü tespit edilmiştir. Tüm bu veriler birlikte değerlendirildiğinde (IPI parametresine göre) sahanın özellikle iz ve ağır metaller açısından kirlilik riski taşıdığı tespit edilmiştir. Canca hidrotermal alterasyon sahasının konumu, yerleşim alanlarına yakınlığı ve bölgenin önemli derelerinden biri olan Harsit Çayı'na yakınlığı da dikkate alındığında sahaya ait element kirliliği riski bağlamında çevresel amaçlı detaylı çalışmaların yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No:113Y569). Yazar arazi çalışmaları sırasındaki katkılarından dolayı Sebahattin GÜNER'e (MTA Genel Müdürlüğü) ve arazi ve laboratuvar çalışmaları sırasındaki yardımlarından dolayı stajyer öğrencileri Şükrü BULUT, Emre TOPÇU ve Mert KARAASLAN'a ve analizlerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Prof.Dr. Ali GÜNDOĞDU'ya teşekkür eder. Yazar, ayrıca makalenin değerlendirilme sürecindeki katkılarından dolayı dergi editörü Canan AKSOY'a ve anonim hakemlere de teşekkür eder.

### **Yazar Katkı Oranları**

Çalışma makalenin yazarı tarafından yürütücülüğü gerçekleştirilen Tübitak 1002 Hızlı Destek Programı kapsamında elde edilen verilerden üretilmiştir. Verilerin elde edilmesinde ve makaleye hazırlanmasında Yazar Alaaddin VURAL katkı vermiştir.

### **Çıkar Çatışması**

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

### **Kaynakça**

- [1] Arslan, M., & Aliyazicioglu, I. (2001). Geochemical and petrological characteristics of the Kale (Gümüşhane) volcanic rocks: implications for the Eocene evolution of eastern Pontide arc volcanism, northeast Turkey. *International Geology Review*, 43(7), 595-610. <https://doi.org/10.1080/0020681010946503>
- [2] Buat-Menard, P., & Chesselet, R. (1979). Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter. *Earth and planetary science letters*, 42(3), 399-411.
- [3] Chen, T. B., Zheng, Y. M., Lei, M., Huang, Z. C., Wu, H. T., Chen, H., ... & Tian, Q. Z. (2005). Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*, 60(4), 542-551. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.072>
- [4] Çiftçi, A., Vural, A., & URAL, M. N. (2021). Analysis of some concepts related to the environment and health with the N-gram method. *Journal of International Health Sciences and Management*, 7(13), 47-54. <https://doi.org/10.48121/jihsam.796465>
- [5] Eren, M. (1983). Gümüşhane-Kale arasının jeolojisi ve mikrofasiyes incelemesi. MMLS Tezi, KÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [6] Feng, H., Han, X., Zhang, W., & Yu, L. (2004). A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization. *Marine pollution bulletin*, 49(11-12), 910-915. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.06.014>
- [7] Güner, S., Yazıcı, E., Ağan, A., Dursun, A., Yılmaz, H., & Yılmaz, Z. (2005). Gümüşhane Yöresi Epitermal Altın Aramaları Prospeksiyon Raporu.
- [8] Güner, S., & Yazıcı, E. N. (2011). Gümüşhane - Bayburt - Trabzon Kıymetli Metal (Au - Ag) ve Baz Metal (Cu - Pb - Zn) Sahaları Envanter Raporları.
- [9] Güven, İ. H. (1993). Doğu Pontidlerin 1/100.000 Ölçekli Kompilasyonu. MTA Genel Müdürlüğü.



- [10] Hooda, P. S. (Ed.). (2010). Trace Elements in Soils. Wiley.
- [11] Huang, J. H., & Matzner, E. (2007). Mobile arsenic species in unpolluted and polluted soils. *Science of the total environment*, 377(2-3), 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.059>
- [12] Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press (Taylor & Francis).
- [13] Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants. CRC Press Inc.
- [14] Kaygusuz, A., Siebel, W., Şen, C., & Satir, M. (2008). Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: the composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97(4), 739-764. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0188-9>
- [15] Mandal, A., & Sengupta, D. (2003). Radioelemental study of Kolaghat, thermal power plant, West Bengal, India: possible environmental hazards. *Environmental Geology*, 44(2), 180-186. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0744-3>
- [16] Mason, R. P., Fitzgerald, W. F., & Morel, F. M. (1994). The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences. *Geochimica et cosmochimica acta*, 58(15), 3191-3198.
- [17] McGrath, S. P. (1995). Chromium and nickel. In B. J. Alloway (Ed.), *Heavy Metals in Soil* (2nd ed., pp. 152-178). Blackie Academic & Professional, London.
- [18] Muller, G. M. M. G. M. G. M. G. P. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- [19] Pelin, S. (1977). Geological study of the area southeast of Alucra (Giresun) with special reference to its petroleum potential. *Karadeniz teknik universitesi, yerbilimleri dergisi, Jeoloji*, 1, 15-20.
- [19] Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315845548>
- [20] Rose, A. W., Hawkes, H., & Webs, J. (1991). *Geochemistry in Mineral Exploration* (2nd ed.). Academic Press.
- [21] Rudnick, R. L., Gao, S., Holland, H. D., & Turekian, K. K. (2003). Composition of the continental crust. *The crust*, 3, 1-64.
- [22] Sposito, G. (2008). Geochemistry in soil science. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 283-289. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9\\_243](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_243)
- [23] Sungur, A., Vural, A., Gundogdu, A., & Soylak, M. (2020). Effect of antimonite mineralization area on heavy metal contents and geochemical fractions of agricultural soils in Gümüşhane Province, Turkey. *Catena*, 184(January 2019), 104255. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104255>
- [24] Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6), 611-627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- [25] Tokel, S. (1972). Stratigraphical and volcanic history of Gümüşhane region.
- [26] Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W. H., Zack, T., Hasözbek, A., Barth, M., Satir, M., & Şen, C. (2010). Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey). *Lithos*, 116(1-2), 92-110. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.01.003>
- [27] Vural, A. (2019). Canca (Gümüşhane, Türkiye) toprak jeokimyası verilerinin Ters Mesafe Ağırlıklandırma (TMA) ve Krigleme enterpolasyon metotlarıyla değerlendirilmesi-ilk bulgular Evaluation of soil geochemistry data of Canca Area (Gümüşhane, Turkey) by means of Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging methods-preliminary findings. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, (158), 197-219.
- [28] Vural, A. (2019b). Evaluation of soil geochemistry data of Canca Area (Gümüşhane, Turkey) by means of Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging methods-preliminary findings. *Bulletin of the Mineral*

Research and Exploration, 158, 195–216. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.430531>

- [29] Vural, A. (2020). Investigation of the relationship between rare earth elements, trace elements, and major oxides in soil geochemistry. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2), 124. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8069-9>
- [30] Vural, A. (2022). The Risk of Exposure to Natural Radiations Induced Hydrothermal Alteration Sites: Case of Canca Site (Gümüşhane, Türkiye). *Göbeklitepe International Journal of Medical Sciences*, 5(7), 14–22. DOI: <http://dx.doi.org/10.55433/gsb.128>
- [31] Vural, A., Çiftçi, A., & Ural, M. N. (2020). Kıymetli Taşlar ve Sömürgecilik: Dijital Veri Materyallerinin Analizi Örneđiyle (Precious Stones and Colonialism: Example of Analysis of Digital Data Materials). *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 7(13), 122–134. <https://doi.org/10.38065/euroasiaorg.404>
- [32] Vural, A., Kaya, S., Başaran, N., & Songören, O. T. (2009). Anadolu Madenciliginde İlk Adımlar. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, MTA Kültür Serisi-3*.
- [33] Vural, A., & Kaygusuz, A. (2019). Petrology of the Paleozoic Plutons in Eastern Pontides: Artabel Pluton (Gümüşhane, NE Turkey). *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 8(2), 1216–1228.
- [34] Vural, A., Ural, M. N., & Çiftçi, A. (2022). Analysis of Energy Raw Material Coal , Industrialization and Industrial Revolution Phenomena with N-gram. *Journal of Investigations on Engineering & Technology*, 5(1), 11–20.
- [35] Yılmaz, Y. (1972). Petrology and structure of the Gümüşhane granite and surrounding rocks, NE Anatolia.



## An Analysis of Acoustical Absorption Characteristics of Agro-Waste Materials

Festus Adda NAPHTALI<sup>1</sup>, Adinife Patrick AZODO<sup>2</sup>, Joseph John AKPAN<sup>3</sup>, Okwuchi Smith ONYEKWERE<sup>4</sup>

(Received: 30.09.2022, Accepted: 20.12.2022, Published Online: 31.12.2022)

### Keywords

Sound level, agro-waste materials, sound attenuation panel, sound absorption coefficient, noise

**Abstract:** Acoustical materials play several important roles in acoustic engineering, such as industrial noise control, room noise control, studio and automotive acoustics. This study presents research on the sound attenuation properties of recycled agro-waste composite materials. The raw materials used to prepare these composite panels are wastes generated from rice, sugar cane, groundnut, oil palm, and corn. Starch was the matrix material, thereby making the composite fully green. Five sound absorption composite panels were produced for the five categories of agro waste by compression molding method. The sound attenuation capacity of the produced composite panels relayed a quality sound absorption coefficient  $\alpha$  ranging from 0.72 – 0.86. An increase in the thickness of the composite panels resulted in a lowering sound absorption coefficient, which indicates that thickness is an important factor in determining the sound attenuation capacity of agro-waste-based composites. The agro-waste material approach in sound control was effective, cost beneficial and offers an environmentally friendly solution to sound control.

### 1. Introduction

Noise emanates from different sources, such as household devices, residential generators, machines, automobiles, aircraft, and commercial and industrial activities [1-4]. Technological innovations, industrial growth and urban development are continually adding to the variety of noise-polluting devices and activities with an increase in the recorded acoustic problem [1][5]. Studies showed that exposure to noise affects people more than other environmental stimuli [5]. The impact is being intensified daily, leading to the increasing need for noise prevention and control [6-10]. Many studies have identified the sources of noise pollution, the causation factors and the effects on human populations and the environment [11-14]. Once noise levels are measured, the identification and rank order of the noise sources responsible for the high-intensity noise level is determined, and the required reductions are afterwards ascertained [15]. Noise reduction to create a healthy acoustic environment is crucial for human psychological well-being and quality of life [16][17]. Acoustical materials play vital roles in acoustic engineering, such as industrial noise control, room control, studio and automotive acoustics.

<sup>1</sup> Department of Pure and Applied Physics, Federal University Wukari, P. M. B 2011, Wukari, Taraba state, Nigeria

<sup>1</sup> Faculty of Engineering Federal University Wukari, P. M. B 2011, Wukari, Taraba state, Nigeria

<sup>1</sup> Faculty of Engineering Federal University Wukari, P. M. B 2011, Wukari, Taraba state, Nigeria

<sup>1</sup> Faculty of Engineering Federal University Wukari, P. M. B 2011, Wukari, Taraba state, Nigeria

Noise transmission loss or reduction is an approach to absorbing sound spontaneously by converting part of the sound energy to a small amount of heat in the intervening object (the absorbing material) rather than transmission or reflection of the sound [18-20]. The absorbing material attenuates the sound pressure incident on it and reduces the amplitudes of the transmitted and reflected sound pressure waves, resulting in a reduced sound pressure level on the opposite side of the absorbing material [3-4][21]. The sound attenuation capacity of any material depends on the material impedance - determined by knowing the attenuation coefficient [21-24]. A material that can absorb and relay more sound waves than it reflects is considered a quality sound-absorbing material [25].

Synthetic materials widely used in sound attenuation processes are sourced from petrochemical sources, thus producing significant carbon footprints [26]. A high temperature associated with the manufacturing processes of synthetic materials releases hazardous substances into the environment, consumes more energy and has a higher global warming potential from cradle-to-site installation based on life cycle assessment [26][27]. Synthetic materials, such as mineral wool, glass wool, rock wool, asbestos, polymer foams, fabric filler, polymer fibres, and glass fibre used as sound attenuation panels, are hazardous as such can affect human health in the short-term period and pollute the environment in the long run [28-36]. In addition, the financial implication involved in the handling and processing of sound attenuation panels from synthetic materials is high [31].

Of late, natural materials are becoming alternative quality materials to synthetic materials as they provide good health to a greener environment [31] [37-38]. Zhu et al. [2] added that synthetic materials have a higher environmental impact than natural fibres. Natural fibre materials are directly obtained from animal, mineral, or vegetable sources [37]. Natural fibre materials are bio-degradable, non-harmful and less hazardous to human health and the environment, including low safety risk in their process [22]. Advantages of natural materials in the fabrication process of sound attenuation panels include their renewable nature, non-abrasive, low-cost, abundance, lower carbon footprint, very low toxicity, low density, lightweight, good biodegradability and of less health and safety concerns [4][39-42].

Natural materials are sourced either in their raw, refined or waste state. Research has revealed that wastes are not wasted because they can become sources of natural fibres [31]. The natural fibres obtained from the wastes can be modified into useful products with technologies [31]. Plenty of agricultural waste, such as coconut trunks, rice straw, rice husks, oil palm trunks, empty fruit bunch, corn cob, rice husks, sugar cane bagasse, oil palm fibre and groundnut husk, abound in Nigeria. The sound attenuation property of some of these wastes has been researched. Agricultural waste materials used in noise attenuation found in the works of literature include waste industrial tea-leaf [43], palm oil male flower spikes fibre [44], waste corn husk fibres [45][46], rice straw [47], coconut fibres [29][48], oil palm frond fibre [42] oil palm mesocarp [36], bamboo fibres [49], natural jute [50], tea-leaf fibres [43] and corn cob [51].

From the foregoing literature, it is recommended that more studies be conducted in this research area for alternatives in the different areas of the applications. Additionally, synthetic matrix material was used in most of the previous researches. Thus, there is a need to investigate fully green-environmentally friendly composite materials for sound attenuation. The above background knowledge instigated this study as it was conducted to investigate the properties of recycled agro-waste material green composites in sound attenuation.

## 2. Materials and method

The agro-waste materials used for producing sound attenuation panels in this research work were corn cob, rice husks, sugar cane bagasse, oil palm fibre and groundnut husk (Figure 1). Starch was used as the matrix material to produce a fully green composite material. Water was used for making the starch pasty (Figure 2).



Corn cob



Rice husk



Groundnut husk



Sugarcane bagasse



Oil palm fibre

**Figure 1. Agro-waste materials**



**Figure 2. Starch**

Three sound attenuation panels of thickness 20, 40 and 60 mm were produced from the five agro-waste materials considered in this study. Table 1 shows the proportion composition of the raw materials used to fabricate the sound attenuation panels. The variation in the agro-waste and the starch quantity depended on the materials' mould thickness.

**Table 1.** The size of each sample for each mould size and the gram of starch added

Agro-waste material	Size of mould (cm)	Agro-waste material (g)	Starch (g)
Corn cob	2	140.13	25
	4	272.24	45
	6	366.81	55
Rice husks	2	223.92	25
	4	435.95	45
	6	631.25	55
Groundnut husk	2	128.15	35
	4	229.47	55
	6	370.36	80
Sugar cane bagasse	2	108.01	45
	4	163.07	65
	6	194.08	70
Oil palm fruit fibre	2	248.41	35
	4	477.05	55
	6	528.05	85

### Steps in the production of sound attenuation panel

**Materials sourcing:** The agro-waste materials were sourced at their disposed point (dumpsites and waste bins), where they have been dumped as waste.

**Sun drying:** The materials were sundried for one week. Sun drying is a traditional drying method for reducing the moisture content of agro-waste by spreading the material under the sun [52].

**Cleaning:** Each of the agro-waste materials was winnowed to remove dirt, sand and other foreign materials in the agro-waste

**Grinding:** This involves breaking large particles of raw materials into small pieces by mechanical means [53].

**Sieving:** This process involves separating fine particles from larger particles using a sieve of 2.00 mm manually. Sieving gave the same pore size distribution for the materials selected.

**Batching:** This is the process of weighing the materials and preparing them for mixing. This involves weighing different agro-waste materials and starch to make up the batch composition for the different sound attenuation panels [53].

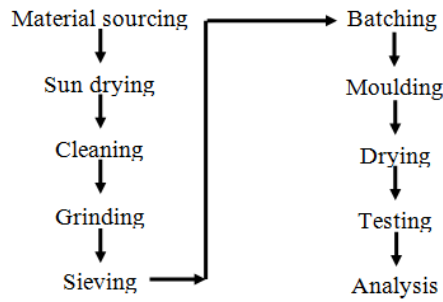
**Molding:** This involves the slurry preparation and casting process. The different batches for each of the materials composition of the slurry are the agro-waste, starch and water. Water is added to the batches gradually to avoid over-softening of the contents. The sound attenuation panels were fabricated using compression molding methods.

**Drying:** The produced sound attenuation panels were dried for some days and later sintered at a temperature of 80°C in an oven [52]. The difference in the weight of the sound attenuation panels before and after drying is presented in Table 2.

**Table 2.** The mass of composite panels before and after oven drying

Agro-wastes	Size of mould (cm)	Before oven drying (g)	After oven drying (g)
Corn Cob	2	147.59	146.20
	4	290.00	289.71
	6	385.64	384.53
Rice Husks	2	227.70	227.22
	4	442.54	440.81
	6	624.89	623.37
Groundnut Husk	2	150.49	150.34
	4	252.71	252.36
	6	419.18	418.53
Sugar cane Bagasse	2	106.46	105.93
	4	203.63	203.03
	6	265.67	266.37
Oil palm fruit fibre	2	266.63	268.45
	4	512.37	510.80
	6	698.48	698.32

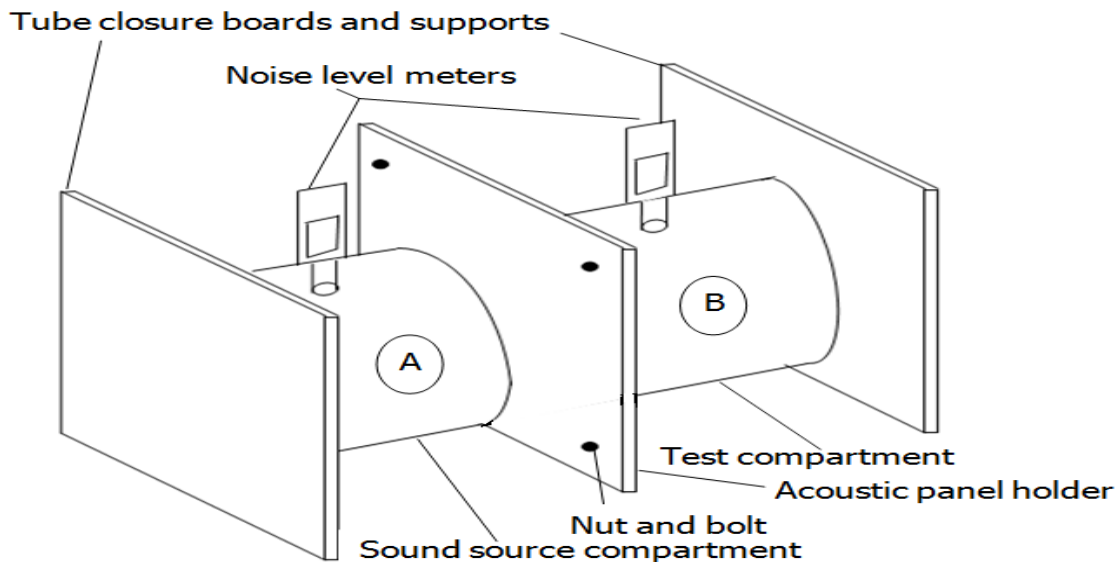
The processing step of the sound attenuation panel is displayed in Figure 3.



**Figure 3. The acoustic panel production process**

### Characterization of agro waste materials in sound reduction

The agro-waste minerals compositions of all sound attenuation panel samples were determined using a fabricated acoustic transmission loss tube set-up with two sound level meters in the Department of Pure and Applied Physics, Federal University Wukari, Taraba state of Nigeria. The acoustic transmission loss tube has two chambers on either side of the chamber with a cushioned interior to avoid noise and vibration transmission in and out of the chambers. At the top of each chamber is a sound level meter set to dBC frequency weighting and slow mode for slow weighting time (1s for each reading). In between the two chambers is the acoustical attenuation panel holder adapted with bolt and nut for firm fixation of the produced panels during the testing process. The acoustic attenuation panel tested is the separation layer between the two chambers. The sound was generated using an MP3 player through a Bluetooth application connection to a mobile phone. The Mp3 player was accommodated inside one of the chambers, while the other chamber was left empty for the acoustic attenuation assessment. The sound generated and the absorbed sound levels were concurrently measured from the sound level meter on either acoustic transmission loss tube chambers. For the varied thicknesses of the sound attenuation panel composites samples produced, a total of ten readings were taken at intervals of one minute with different volumes and sounds to ascertain the level of sound attenuation of the acoustic panel. The experimental setup is shown in Figure 4. Due to the frequency of the vibration of the sound source, the sound levels were noted using a digital stopwatch at three intervals, five minutes apart from each reading.



**Figure 4. A set-up of an acoustic transmission loss tube**

### Evaluation of the sound absorption coefficient

The sound absorption coefficient used to evaluate the sound attenuation capacity of agro-waste materials was the ratio of the absorbed energy to the incident energy and is represented by  $\alpha$  [4][54]. The sound absorption coefficient of the agro-waste materials  $\alpha$  is calculated using the following equations;

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1)$$

Where  $E_a$  absorbed wave energy and  $E_i$  incident wave energy [55]

$$\alpha = 1 - \frac{E_r}{E_i} \quad (2)$$

Where  $E_r$  reflected wave energy, and  $E_i$  incident wave energy [55]

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3)$$

Where  $R$  is sound reflection coefficient [55]

$$\alpha = \frac{I_{Abs}}{I_{Inc}} \quad (4)$$

Where  $I_{Abs}$  sound intensity absorbed,  $W/m^2$ ,  $I_{Inc}$  incident sound intensity,  $W/m^2$  [55]

### Analysis of data

The data obtained from testing the sound attenuation composite panel in this study were analyzed using SPSS version 20.0 and Microsoft Office Excel version 2016 software. Descriptive and inferential statistics analysis was carried out on the data obtained.

### Results and discussion

Fifteen sound attenuation composites were produced. Three (20, 40, and 60 mm thicknesses) from each of the natural waste materials, corn cob, rice husks, sugar cane bagasse, oil palm fibre and groundnut husk. The sound attenuation composites' lengths and breadths were approximately equal dimensions. According to studies, the thickness of any sound attenuation composites is one of the parameters used in assessing the sound attenuation capacity [18][56]. Table 3 summarises the measured incident sound level produced from the source and the absorbed sound level across the 20, 40 and 60 mm thickness for the agro-waste-based sound attenuation panels. The average value for each agro-waste-based sound attenuation panel, the corn cob, rice husks, sugar cane bagasse, oil palm fibre and groundnut husk showed that the incident sound level was higher as compared to the absorbed sound level (Table 3).



Table 3. Summary of sound attenuation properties of agro waste materials

Agro waste materials	Thickness (cm)	Incident sound pressure level (decibel)				Absorb sound pressure level (decibel)			
		1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	Average	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	Average
Oil palm fruit fibre	2	107.10	107.90	107.20	107.40	87.60	86.90	87.50	87.30
	4	107.30	107.70	107.90	107.60	84.90	84.20	84.40	84.50
	6	107.10	107.10	107.50	107.20	81.00	80.90	80.70	80.90
Groundnut husk	2	107.80	107.90	108.20	108.00	93.70	93.20	93.00	93.30
	4	107.40	107.50	107.30	107.40	87.50	87.60	87.30	87.50
	6	106.30	106.30	106.30	106.30	83.70	83.80	83.30	83.60
Bagasse	2	106.40	107.00	106.40	106.60	89.70	88.90	88.90	89.20
	4	107.20	106.80	107.10	107.00	84.60	85.00	83.60	84.40
	6	106.80	107.10	107.10	107.00	80.60	81.30	81.90	81.30
Rice husk	2	106.90	106.90	107.10	107.00	90.50	91.40	90.90	90.90
	4	107.00	106.70	106.10	106.60	80.90	79.60	80.00	80.20
	6	106.70	107.10	107.30	107.00	77.90	76.10	76.40	76.80
Corn cob	2	106.60	106.50	106.70	106.60	89.70	89.30	88.70	89.20
	4	106.60	106.50	106.70	106.60	82.10	82.40	83.70	82.70
	6	106.30	106.20	106.70	106.40	79.60	80.60	79.20	79.80

The quality of sound attenuation waste material composite panels produced in this study was determined by the sound absorption coefficient [21][25]. From the literature, the sound absorption coefficient is expressed as a single value format ranging from 0.0 (reflects sound energy but does not attenuate mid-frequency sounds) to 1.0 (attenuates mid-frequency sounds completely). The sound absorption coefficient obtained using Bai et al. [55] expression for the five sound attenuation waste material composites produced is presented in Table 4. The sound pressure level in this study was determined at a frequency range of 31.5 Hz to 8 kHz (from the specifics of the research instrumentation used). The maximum sound absorption coefficient recorded was 0.86 against a groundnut husk of 60 mm thickness, while the minimum was 0.72 against rice husk of 20.0 mm. Therefore, the sound absorption coefficient range obtained in this study was found to be of good quality. The ranges of the sound absorption coefficient obtained in this study considering the thicknesses of sound attenuation waste material composites produced are similar (Ismail et al., 2010). The sound absorption coefficient for the panels is 0.72 - 0.79 for 20.0 mm, 0.75 - 0.81 for 40.0 mm and 0.81 - 0.86 for 60.0 mm sound attenuation panels with rice husk of 20.0 mm thickness, recording the lowest and groundnut husk of 60.00 mm of thickness recording the highest sound absorption coefficient.

Table 4. Sound reduction percentage (%) and sound absorption coefficient ( $\alpha$ ) of the agro waste materials

Materials	Thickness (mm)	SLS (Decibel)	ASL (Decibel)	SAC ( $\alpha$ )
OPF	20.00	107.40	87.30	0.81
	40.00	107.60	84.50	0.79
	60.00	107.20	80.90	0.75
GH	20.00	108.00	93.30	0.86
	40.00	107.40	87.50	0.81
	60.00	106.30	83.60	0.79
SG	20.00	106.60	89.20	0.84

	40.00	107.00	84.40	0.79
	60.00	107.00	81.30	0.76
RH	20.00	107.00	90.90	0.85
	40.00	106.60	80.20	0.75
	60.00	107.00	76.80	0.72
CC	20.00	106.60	89.20	0.84
	40.00	106.60	82.70	0.78
	60.00	106.40	79.80	0.75

Table 5 shows the comparative analysis using independent-sample *t*-test analyses of the incident and absorbed sound. The sound pressure levels were measured using the transmission loss tube. This was done to ascertain the sound attenuation property of five categories of the sound attenuation panels produced from oil palm fruit fibre, groundnut husk, sugar cane bagasse, rice husk and corn cob. Independent-sample *t*-test analyses on the incident and absorbed sound pressure levels were measured using the transmission loss tube. The independent *t*-tests showed statistically significantly higher mean sound level values of incident sound pressure ( $107.42 \pm 0.34$ ) when compared to absorb sound pressure level ( $84.89 \pm 2.70$ ) for oil palm fruit fibre with  $p = 0.00$  (Table 5). For the other four materials, similar trends were observed. The groups' means are significantly different as the *p*-value is less than 0.05. The statistically significant difference between the mean sound level values of incident sound pressure and absorbed sound pressure level for each composite panel produced implies that the panels are effective sound absorbers as they reduced sound level (Table 5).

Table 5. Independent sample *t*-test for sound level between sound level from the source and the absorb sound level

Agro waste material	Sound level	Descriptive statistics			Paired samples test		
		Mean	SD	SEM	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i> -value
Oil palm fruit fiber	SLS	107.42	0.34	0.11	24.78	8	0.00
	ASL	84.89	2.70	0.90			
Groundnut husk	SLS	107.22	0.74	0.25	15.10	8	0.00
	ASL	89.19	4.19	1.40			
Bagasse	SLS	106.88	0.30	0.10	18.03	8	0.00
	ASL	85.88	3.33	1.11			
Rice husk	SLS	106.87	0.35	0.12	10.25	8	0.00
	ASL	84	6.73	2.24			
Corn cob	SLS	106.53	0.18	0.06	15.69	8	0.00
	ASL	85.06	4.16	1.39			

One-way analysis of variance (ANOVA) test was used to determine the effect of the thickness of the produced sound attenuation composite panel variables on the sound level. The analysis of variance (ANOVA) for sound attenuation level is shown in Table 6. *F*-value is the ratio of variance group means to the mean within-group variances used to decide whether to accept or reject the null hypothesis. The *p*-values were used as a tool to check the significance of each of the coefficients, which is necessary to understand the pattern of the mutual interactions between the test variables. A significance level of 5% was used, implying that all terms with *p*-value less than 0.05 were considered significant. The sound absorption coefficient significance from the effect of the thickness of the produced sound attenuation composite panel variables dataset is observed at a larger *F*-value and a smaller magnitude of *p*-values. The model regression *F*-values of 64.06 imply that the model is significant, validated by the *p*-value is less than 0.05. Therefore, the ANOVA indicates that the thickness of the produced sound attenuation composite panel has a significant effect on the sound attenuation of the composites ( $p$ -value < 0.05) (Table 6).

In summary, the study observed that the higher the thickness of the sound attenuation of the composites the higher the sound attenuation capacity represented in its sound absorption coefficient. The optimal sound attenuation panel thickness on the sound absorption coefficient observed in this study is similar to the findings of Masrol *et al.* [44]. Furthermore, the sound attenuation panels attenuated the sound pressure level with its sound absorption coefficient ranging from 0.72 – 0.86, similar to the findings of Masrol *et al.* [44], who obtained a sound absorption coefficient ranging from 0.76 – 0.86. In this study and that of Masrol *et al.* [44], the research goes that the higher the thickness of the composite material, the higher the sound attenuation capacity of the panel.

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) for thickness effect on sound attenuation level

	Sum of squares	<i>Df</i>	Mean square	<i>F</i> -value	<i>p</i> -value
Between Groups	699.63	2	349.81	64.06	0.00
Within Groups	229.34	42	5.46		
Total	928.97	44			

### 3. Conclusion

The low-cost sound attenuation panels (eco-friendly, biodegradable and economical) were fabricated from agro waste as an alternative to synthetic sound-absorbing materials. The analysis of the acoustic characteristics of the produced materials showed that sound attenuation panels attenuated the sound pressure level with its sound absorption coefficient ranging from 0.72 – 0.86. Furthermore, the analysis of the acoustic characteristics of agro-waste materials with regard to the thickness of the materials showed that the higher the thickness of the sound attenuation waste material composites, the lower the sound absorption coefficient of the material composites. Thus, it is recommended that the produced and analyzed green composite should be used to substitute synthetic materials in sound attenuation where applicable.

### Author Contribution

### Conflict of Interest

The authors confirm that there is no known conflict of interest or common interest with any institution/organization or person.

### References

- [1] Azodo, A.P., & Adejuyigbe S.B. (2013). Examination of noise pollution from generators on the residents of Obantoko, Ogun state, Nigeria. *Asian Journal of Engineering, Sciences & Technology*, 3(1), 31-41. Retrieved from <http://www.ajest.iqra.edu.pk/pdf/download.php?Volume=PFUjfnys%3D&id=6>
- [2] Zhu, X., Kim, B. J., Wang, Q., & Wu, Q. (2014). Recent advances in the sound insulation properties of bio-based materials. *BioResources*, 9(1), 1764-1786.
- [3] Paşayev, N., Kocatepe, S., & Maraş, N. (2019). Investigation of sound absorption properties of nonwoven webs produced from chicken feather fibers. *Journal of Industrial Textiles*, 48(10), 1616-1635.
- [4] Sujon, M. A. S., Islam, A., & Nadimpalli, V. K. (2021). Damping and sound absorption properties of polymer matrix composites: A review. *Polymer Testing*, 104, 107388.
- [5] Mohd, F.B.M. (2011). Design of a noise enclosure for portable generator (Thesis). Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Durian Tunggal, Malaysia.
- [6] Wu, Q., Zhang, X., & Cao, G. (2019). Study on the prevention and control measures of China's urban road traffic noise pollution. In E3S web of conferences (Vol. 96, p. 03003). EDP Sciences.
- [7] Fan, X., Li, L., Zhao, L., He, H., Zhang, D., Ren, Z., & Zhang, Y. (2020). Environmental noise pollution control of substation by passive vibration and acoustic reduction strategies. *Applied Acoustics*, 165, 107305.
- [8] Farooqi, Z. U. R., Sabir, M., Latif, J., Aslam, Z., Ahmad, H. R., Ahmad, I., Imran, M. & Ilić, P. (2020). Assessment of noise pollution and its effects on human health in industrial hub of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(3), 2819-2828.
- [9] Kamble P. V., Patil. G. T , & Er. Mali. D. S. (2020). A Study of Noise Pollution in Kolhapur City with Special Reference to Silence Zone. *Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 4(4), 511-514.
- [10] Wu, S., Li, X., Qi, X., Li, C., & Xu, T. (2020, June). Study on Noise Pollution of 220kV Substations in Liaoning Province. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 526, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.
- [11] Bisong, S. A., Umana, A. N., Onoyom-Ita, V., & Osim, E. E. (2004). Hearing acuity loss of operators of food grinding machines in Calabar, Nigeria. *Nigerian Journal of Physiological Sciences*, 19(1), 20-26.
- [12] Oguntoke, O., Odeshi, T.A., & Annegarn, H.J. (2012). Assessment of noise emitted by vibrator-block factories and the impact on human health and urban environment in Nigeria. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 7(1), 57-68.
- [13] Aderoju, O.M., Ibrahim, M., Onuoha, H.U., Adebowale, R.K., & Oke, A.B. (2013). Assessment of the level of noise from base transceivers' station using geospatial techniques: In Abuja Municipal Area Council. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSRJESTFT)*, 7(3), 30-39.
- [14] Azodo, A.P., Ismaila, S.O., & Owoeye, F.T. (2018). Investigation of occupational noise exposure and its physiological effect on landscape gardeners. Proceedings of the 2018 International Conference on SET: A driving force for sustainable development tagged COLENG 2016, Federal University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria.

- [15] Hansen, C.H., & Goelzer, B.I.F. (2001) Engineering Noise control. In: Goelzer, B.I.F., Hanse, C.H., Sehrndt, G.A. (Eds.), Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control (pp. 245-296). Geneva: World Health Organization. Retrieved from [https://www.who.int/occupational\\_health/publications/noise10.pdf](https://www.who.int/occupational_health/publications/noise10.pdf)
- [16] Gai, X. L., Li, X. H., Zhang, B., Liu, Y. Q., & Xing, T. (2015, March). The sound absorption property of microperforated panel with partitioned cavity. In 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference (pp. 345-348). Atlantis Press.
- [17] Azodo, A. P., Onwubalili, C., Mezue, T. C., Nwaokocho, C. N., Akpan, U. V. and Giwa, S. O. (2019). Effect of factory process and location on residential area noise level. 3rd International Conference on Engineering for a Sustainable World, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Covenant University, Ota, Nigeria, 2019.
- [18] Tang, X., & Yan, X. (2017). Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 360-380.
- [19] Shao, C., Long, H., Cheng, Y., & Liu, X. (2019). Low-frequency perfect sound absorption achieved by a modulus-near-zero metamaterial. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8.
- [20] Chanlert, P., & Ruamcharoen, P. (2021). Sound absorption properties of rigid polyurethane foam composites with rubber-wood sawdust as a natural filler. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1719, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.
- [21] Joseph, E. B. (1997). Optimal Design of an Enclosure for a Portable Generator. An M. Sc Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [22] Abdullah, Y., Putra, A., Effendy, H., Farid, W. M., & Ayob, M. R. (2011). Investigation on natural waste fibers from dried paddy straw as a sustainable acoustic absorber. In 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET) (pp. 311-314). IEEE.
- [23] Witczak, E., Jasińska, I., Lao, M., Krawczyńska, I., & Kamińska, I. (2021). The influence of structural parameters of acoustic panels textile fronts on their sound absorption properties. *Applied Acoustics*, 178, 107964.
- [24] Čulík, M., Danihelová, A., Ondrejka, V. and Aláč, P. (2020). Sound absorption on board construction materials used in wood buildings. *Akustika*, 37, 52-57
- [25] Kassim, M. S. (2017). Experimental study of sound absorption properties of reinforced polyster by some natural materials. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, 17(4), 798-812.
- [26] Yahya, M. N., & Chin, D. D. V. S. (2017, August). A review on the potential of natural fiber for sound absorption application. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 226, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- [27] Asdrubali, F. (2006, May). Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. In *Proceedings of Euronoise* (Vol. 30, pp. 1-10). Tampere: European Acoustics Association.
- [28] Zulkifli, R., Nor, M. M., Tahir, M. M., Ismail, A. R., & Nuawi, M. Z. (2008). Acoustic properties of multi-layer coir fibers sound absorption panel. *Journal of Applied Sciences*, 8(20), 3709-3714.
- [29] Zulkifli, R., Nor, M. M., Ismail, A. R., Nuawi, M. Z., Abdullah, S., Tahir, M. M., & Rahman, M. A. (2009). Comparison of acoustic properties between coir fiber and oil palm fiber. *European Journal of Scientific Research*, 33(1), 144-152.
- [30] Abdullah, Y., Putra, A., Effendy, H., Farid, W., & Ayob, M. (2011b). Dried paddy straw fibers as an acoustic absorber: a preliminary study. *International Journal of Renewable Energy Resources* 3(2013), 52-56.
- [31] Saad, M. J., & Kamal, I. (2012). Kenaf core particleboard and its sound absorbing properties. *Journal of Science and Technology*, 4(2).23-33.
- [32] Xiang, H., Wang, D., Liua, H., Zhao, N., & Xu, J. (2013). Investigation on sound absorption properties of kapok fibers. *Chinese Journal of Polymer Science*, 31(3), 521-529.
- [33] Abdullah, Y., & Putra, A. (2014). Investigation on sound absorption coefficient of natural paddy fibers. *International Journal of Renewable Energy Resources*, 3(1), 8-11.
- [34] Khair, F. A., Putra, A., MohdNor, M. J., Atiqah, N., & Selamat, M. Z. (2014). Preliminary Study on Bamboo as Sound Absorber. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 554, pp. 76-80). Trans Tech Publications Ltd.
- [35] Arenas, J. P. (2016). Applications of acoustic textiles in automotive/transportation. In *Acoustic textiles* (pp. 143-163). Springer, Singapore.

- [36] Abdul-Latif, H., Yahya, M. N. B., Rafiq, M. N., Sambu, M. A. T. H. A. N., Ghazali, M. I., & Mohamed Hatta, M. N. (2015). A preliminary study on acoustical performance of oil palm mesocarp natural fiber. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 773, pp. 247-252). Trans Tech Publications Ltd.
- [37] Mathan, S., Musli, N. Y., Hanif, A., Mohamed, N. M. H., & Mohd Imran, B. G. (2015). The Acoustical Characteristics Analysis on Different Type of Natural Fibers. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 773, pp. 242-246). Trans Tech Publications Ltd.
- [38] Yang, T., Hu, L., Xiong, X., Petrú, M., Noman, M. T., Mishra, R., & Militký, J. (2020). Sound absorption properties of natural fibers: A review. *Sustainability*, *12*(20), 8477.
- [39] Abdul-Razak, M. A., Khoo, K. C., & Khozirah, S. (1988). Prospects and potential of the oil palm trunk as a source of lignocellulosic raw material, *The Malayan Forester*, *51*(3), 164-175.
- [40] D'Alessandro, F., & Pispola, G. (2005). Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2005, No. 6, pp. 2209-2218). Institute of Noise Control Engineering.
- [41] Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & vibration*, *44*(7), 12-18.
- [42] Zulkifli, R., Nor, M. M., Ismail, A. R., Nuawi, M. Z., & Tahir, M. M. (2009). Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fiber sound absorption panels. *European Journal of Scientific Research*, *28*(2), 242-252.
- [43] Ersoy S and Kucuk H. (2009) Investigation of industrial tea-leaf-fiber waste material for its sound absorption properties. *Applied Acoustics* *70*, 215 -220.
- [44] Masrol, S. R., Rosdin, M. K. R., & Ibrahim, M. N. (2013, July). Sound absorption characteristics of palm oil male flower spikes fiber reinforced composite. In *International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER2013)* (Vol. 1, p. 3).
- [45] Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., & Swaminathan, K. R. (1991). Acoustic aspects of farm residue-based particle boards. *Bioresource technology*, *35*(1), 67-71.
- [46] Tang, X., Zhang, X., Zhang, H., Zhuang, X., & Yan, X. (2018). Corn husk for noise reduction: robust acoustic absorption and reduced thickness. *Applied Acoustics*, *134*, 60-68.
- [47] Yang, H. S., Kim, D. J., & Kim, H. J. (2003). Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource technology*, *86*(2), 117-121.
- [48] Fouladi, M. H., Ayub, M., & Nor, M. J. M. (2011). Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Applied Acoustics*, *72*(1), 35-42.
- [49] Koizumi, T., Tsujiuchi, N., & Adachi, A. (2002). The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *WIT Transactions on The Built Environment*, *59*, 157-166.
- [50] Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied acoustics*, *72*(2-3), 108-114.
- [51] Faustino, J., Pereira, L., Soares, S., Cruz, D., Paiva, A., Varum, H., Ferreira, J. & Pinto, J. (2012). Impact sound insulation technique using corn cob particleboard. *Construction and Building Materials*, *37*, 153-159.
- [52] Putra A., Abdullah, Y., Efendy, H., Farid, W. M., Ayob, M. R., and Py M. S. (2013). Utilizing Sugarcane Wasted Fibers As A Sustainable Acoustic Absorber, *Procedia Engineering* *53*, 632 – 638
- [53] Owoeye, F. T., Azodo A. P. and Udo S. B. (2014). Performance evaluation of ceramics microfiltration membrane for water treatment. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*. *7*(2). 1115-1126. Available at <http://dx.doi.org/10.15282/jmes.7.2014.10.0108>
- [54] Cao, L., Fu, Q., Si, Y., Ding, B., & Yu, J. (2018). Porous materials for sound absorption. *Composites Communications*, *10*, 25-35.
- [55] Bai M. R., Lo Y.-Y., Chen Y. S. Impedance measurement techniques for one-port and two-port networks. *The Journal of the Acoustical Society of America* *2015*:138:2279–90. <https://doi.org/10.1121/1.4931440>
- [56] Wang Y, Zhang C, Ren L, Ichchou M, Galland M-A, Bareille O. (2014). Sound absorption of a new bionic multi-layer absorber. *Compos Struct*, *108*, 400–408.



## Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Kaynaklarının Retrospektif Değerlendirilmesi

Alaaddin VURAL<sup>1</sup> , M.Nuri URAL<sup>2</sup> , Ali ÇİFTÇİ<sup>3</sup> 

(Alınış / Received: 06.10.2022, Kabul / Accepted: 28.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Alternatif enerji  
Yenilenebilir enerji  
Nükleer enerji  
Konvansiyonel enerji  
Güneş Enerjisi  
Hidroelektrik enerji

**Öz:** Bu çalışmayla yenilenebilir ve nükleer enerji kaynaklarının retrospektif değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilgili kavramlara yönelik anahtar kelimelerin belirlenmesi için genel bir literatür taraması gerçekleştirilerek, araştırılacak konuları kapsayıcı anahtar kelimeleri belirlenmiştir. Belirlenen anahtar kelimelerin birbirleri ile ilişkileri dikkate alınarak bu anahtar kelimeler alt gruplara ayrılmış ve elde edilen gruplara yönelik n-gram analizleri gerçekleştirilmiştir. Kelime gruplarının belirlenmesinde metin içerisindeki anlatım sırasına paralel bir sıralama izlenmiştir. Bunun için öncelikle enerji türleri ile ilgili genel sınıflama incelenmiştir. Daha sonra hem kronolojik olarak hem de bu çalışmada ikinci sırada geçen fosil yakıtlar ve fosil yakıt türleri incelenmiştir. Ardından yine kronolojik sıra ve bu yazıdaki anlatım sırasına paralel olarak yenilenebilir enerji türleri ve kavramları verilmiştir. Benzer mantıkla nükleer enerji ile ilgili kavramlar bir arada incelenmişlerdir. Bunu müteakiben çevre ile enerji konularının kesişim noktasını teşkil eden kavramlar verilmiştir. Son olarak ise kronolojik sırayı takiben, nispeten daha yeni bir enerji türü olan güneş enerjisi ile ilgili kavramlar bir arada sunulmuştur.

Yapılan çalışma sonucunda seçilen uygun anahtar kelimelerle retrospektif değerlendirilmesi yapılan kavram ve olguların anlamlı ilişkilerinin belirlenebileceği gösterilmiştir. Ayrıca yine n-gram sonuçlarından yararlanılarak ihtiyaç duyulacak yeni anahtar kelimeler kullanılarak konuyla ilgili daha detay verilere de ulaşılabileceği, başka bir ifadeyle de değerlendirilmesi yapılacak kavramların derin analizlerine de imkân sunduğu görülmüştür.

## Retrospective Evaluation of Renewable and Nuclear Energy Sources

### Keywords

Alternative energy  
Renewable energy  
Nuclear energy  
Conventional energy  
Solar energy  
Hydroelectric energy

**Abstract:** In this study, it was aimed to evaluate the renewable and nuclear energy sources retrospectively. For this purpose, a general literature review was carried out to determine the keywords for related concepts and keywords covering the topics to be researched were determined. Considering the relationships of the determined keywords with each other, these keywords were divided into subgroups and n-gram analyzes were carried out for the obtained groups. In the determination of the word groups, an order parallel to the order of expression in the text was followed. For this, first of all, the general classification of energy types was examined. Then, fossil fuels and fossil fuel types, which are in the second place in this study, were examined both chronologically. Then, again in chronological order and in parallel with the order of expression in this article, renewable energy types and concepts are given. With a similar logic, concepts related to nuclear

<sup>1</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane/Türkiye

<sup>2</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane/Türkiye

<sup>3</sup> Amasya Üniversitesi, Merzifon İİBF- Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Amasya/ Türkiye

energy are examined together. Following this, the concepts that constitute the intersection point of environment and energy issues are given. Finally, following the chronological order, concepts related to solar energy, which is a relatively new type of energy, are presented together.

As a result of the study, it has been shown that with the appropriate keywords selected, the meaningful relationships of the concepts and cases evaluated retrospectively can be determined. In addition, it has been seen that more detailed data can be reached by using the new keywords that will be needed by making use of the n-gram results, in other words, it provides an opportunity for deep analysis of the concepts to be evaluated.

## 1. Giriş

Günümüzde enerji tedarik ve arz güvenliği insanlığın ajandasındaki en önemli küresel konuların başında gelmektedir. Ülkeler, hatta bloklar arasında vuku bulan birçok mücadelenin temelinde enerji kaynaklarına sahip olmak, bu kaynakları sürdürülebilir şekilde kontrol altında tutmak, yönetmek, hatta manipüle etmek stratejik bir önem arz etmektedir. Dolayısıyla enerji kaynaklarına sahip olmak, ulaşmak ve yönetebilmek uluslararası arenanın ilgilendiği en başat konulardandır. 2022 yılında gerçekleşen Rusya'nın Ukrayna'yı işgali de bu anlamda enerjinin ve enerji tedariki ve güvenliğinin ne kadar değerli ve önemli olduğunu hatırlatmıştır. Enerji kaynaklarına sahip olup da bunları yönetecek gücü, kapasitesi ve kabiliyeti olmayan ülkeler ise emperyal güçlerin mücadele alanı haline gelebilmekte ve bu güçler tarafından siyasal-ekonomik istikrarsızlığa sürüklenmektedirler [1]. Buna günümüzde en somut örnek olarak 2003 yılında başlayan Irak'ın işgali ve tam manasıyla bitmemiş olan işgal sonrası süreç verilebilir.

İnsanlık, tarih boyunca değişik enerji kaynaklarından yararlanmıştır [2,3]. Bu yararlanma elde ettiği bilgi ve ulaştığı teknolojik imkanların harmanında dönemsel olarak farklılıklar göstermiştir. İlk kullandığı enerji kaynaklarının başında doğal olarak güneş enerjisi gelir. Bir diğer enerji kaynağı ise rüzgâr enerjisidir. Coğrafi avantajları ile ilişkili olarak bazı insan topluluklarının jeotermal enerji imkanlarından yararlanması da bu anlamda insanlık tarihinin başlangıcına kadar uzanmaktadır [4,5].

Sanayii devrimi sonrası neredeyse insanlığın vazgeçilmez enerji kaynaklarının başında gelen fosil yakıtlarla (kömür, petrol, doğal gaz) tanışması bu bağlamda oldukça yeni bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır [6]. Günümüzde ise modern teknolojik imkanların da avantajları ile kullanılan/yararlanılan enerji kaynağı türleri oldukça çeşitlenmiş ve çok eskiden beri bilinen bazı enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrolik) yeni teknolojilerle evrimsel bir devrim geçirerek yeniden ve daha kapsamlı bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Hatta bir yönüyle bu enerji kaynakları yeniden keşfedilmiştir. Keşfedilmesi ve yararlanılması 20. yüzyılın başlarına denk gelen ve bu anlamda belki diğerlerine göre en genç enerji üretim kaynağı/şekli ise nükleer enerjidir.

Artan enerji talepleriyle birlikte, nükleer enerji, bunun yanında diğer yenilenebilir-alternatif enerji kaynakları gerek teknoloji geliştirme gerekse bu kaynakların hammaddesi bağlamında günümüzde ciddi önem arz etmekte ve gündem oluşturmaktadır. Birçok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji kaynakları içerisindeki oranını arttırmaya çalışmakla kalmamakta, ayrıca füzyon, dalga enerjisi vb. yeni enerji kaynaklarının kullanılması imkanlarını aramaya devam etmektedir.

Bu çalışmanın ana konusunu yenilenebilir enerji kaynakları ve ilişkili kavramlar oluşturmaktadır. Bu kavramların jeopolitik perspektifte tarihi gelişiminin seyri, sayısal ortamdaki verilere dayanarak incelenmiştir. Bu incelemede kelimelerin kullanım sıklıklarının dönemsel değişimlerinden yararlanılmıştır. Bu süreç sırasında gözlenen değişimlerin, n-gram metoduyla irdelenip irdelenemeyeceği, ve tarihi gelişmeler ile ilişkili olup olmadığı ortaya konmaya çalışılmıştır.

## 2. Çalışmanın Amacı

Çalışmanın amacı nükleer ve alternatif enerji kaynaklarının tarihi seyrini açıklamaktır. Bunun için Google tarafından sayısal ortama aktarılmış olan çok sayıdaki kitapta yenilenebilir, alternatif ve nükleer enerji ile ilgili kavramlar ve bu kavramlarla doğrudan ve dolaylı ilişkili olduğu düşünülen anahtar kelimelerden yararlanılmıştır. Bahse konu enerji kaynaklarına ilginin zamansal değişiminin Google veri tabanındaki kitaplarda ilgili kavramların geçme oranlarıyla paralel olduğu varsayımından yola çıkılmıştır. Bunun yanında bu oranların yıllara göre değişimi ile yakın dünya tarihinde yaşanmış siyasal/sosyal ve ekonomik olayların ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmayla, kullanılan anahtar kelimelerin jeopolitik perspektifte ele alınması ve söz konusu

kavramların literatürdeki kullanım sıklığının anlamlı bir desen gösterip göstermediğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmayla aynı zamanda n-gram metodunun farklı disiplinlerde veri madenciliğinde kullanıma imkanlarına da dikkat çekilmeye çalışılmıştır.

### 3. Materyal ve Metot

#### 3.1. N-gram analizi

Veri madenciliğinde ve verilerin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden birisi de n-gram analizidir [1,6,9–23]. Bu çalışmada n-gram yöntemi, books.google.com alt domaininde yer alan İngilizce kitaplarda konvansiyonel enerji, yenilenebilir enerji, yeşil enerji, nükleer enerji ve alternatif enerji konularıyla ilişkili olan ifadeler kullanılarak uygulanmıştır. Google da kayıtlı kitaplarda yer alan İngilizce kavramları incelenerek tarihsel süreçlerle ilişkilendirilmeye ve bu şekilde literatür bir veri kaynağı olarak kullanılmaya çalışılmıştır. Bu kavramlara verilen önemlerdeki değişimler literatürde tekrar etme sıklıkları ile ilişkili kabul edilmiştir. Kavramların tarihi süreçteki geçme sıklıklarındaki değişimin alt plandaki gerekçeleri anlamlandırılmaya çalışılmıştır. Google günümüzde, pek çok dilde ve pek çok konuda yayınlanmış kitapların ilgililerine sunulduğu en önemli platformlardan biridir. Çok zengin bir kitap veri bankasına sahiptir.

Tablo 1’de farklı diller için Google n-gram veri tabanına kayıtlı kitapların farklı dillere göre 2019 yılı itibariyle miktarları verilmiştir. Bu sayılar nerdeyse her geçen dakika artmaktadır. Google külliyatında farklı dillerde n-gram analizi yapma imkânı bulunmakla birlikte, İngilizce yaklaşık 250 yıldır küresel bir kullanımda olması nedeniyle Google külliyatında çoğunlukla İngilizce kitaplar bulunduğu için (Tablo 1) bu çalışmada n-gram metodu sadece İngilizce için kullanılmıştır. N-gram metodu ile ilgili detaylar Çiftçi vd. [22] ve Vural ve Çiftçi [20]’de bulunabilir.

**Tablo 1.** Google n-gram veri tabanında farklı dillere göre bulunan kitap ve sözcük sayısı

Dil	Kitap Sayısı	Sözcük Sayısı
İngilizce	4.541.627	468.491.999.592
İspanyolca	854.649	83.967.471.303
Fransızca	792.118	102.174.681.393
Almanca	657.991	64.784.628.286
Rusça	591.310	67.137.666.353
İtalyanca	305.763	40.288.810.817
Çince	302.652	26.859.461.025
İbranice	70.636	8.172.543.728

Google külliyatında tarama yapıldığında hemen hemen her kavramın, kavramın ne olduğundan bağımsız olarak, belli bir tarihten önce sıfır değerine çok yakın bir sonuç verdiği ve y ekseninde okunabilir bir sonuç vermediği gözlemlenmektedir. N-gram metodu uygulanırken, araştırılan kelime, kelime öbeği, kavram ya da kavramların n-gram grafiğinde dikey hareketlenmeye başladığı bu ilk tarihler taramanın başlangıç tarihi olarak seçilmiştir. Taramanın bitiş tarihi olarak ise Google n-gram arayüzünün izin verdiği son tarih olan 2019 kullanılmıştır. Grafiklerin oluşturulmasında yumuşatma faktörü varsayılan değer kullanılarak 3 olarak belirlenmiştir.

Analiz başlangıç yıllarının tayini için, grafiğin y eksenini sıfırdan farklı noktada kestiği, başlangıç tarihinden önce de veri bulunduğu tespit edilen durumlarda tarih öne, grafiğin y eksenini sıfırda kestiği, başlangıç tarihinden sonra bir süre hiçbir veri olmayan durumlarda tarih ileriye alınmıştır. Bu şekilde her grafiğin verilerin gözlemlenmeye başladığı tarihle tutarlı bir şekilde başlaması amaçlanmıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında yenilenebilir ve alternatif enerji kaynakları yanında nükleer enerji ile ilişkili olan ve anlamsal birliktelik gösteren kavram ve/veya kelimelerin literatürdeki kullanımları, kullanım miktarları belirlenmiş ve grafiklerde bu iniş/çıkışların sosyolojik, psikososyolojik, politik ve/veya jeopolitik perspektifinde değerlendirilmesi yapılmıştır.

Her bir grafik belli bir anlam bütünlüğünde olabilecek kavramlar aramaya dahil edilerek oluşturulmuştur. Kelime gruplarının belirlenmesinde metin içerisindeki anlatım sırasına paralel bir sıralama izlenmiştir. Bunun için öncelikle enerji türleri ile ilgili genel sınıflama incelenmiştir (alternatif enerji, yenilenebilir enerji ve geleneksel enerji). Daha sonra hem kronolojik olarak hem de bu çalışmada ikinci sırada geçen fosil yakıtlar ve fosil yakıt türleri incelenmiştir (kömür, petrol, doğal gaz ve fosil yakıt). Daha sonra yine kronolojik sıra ve bu yazıdaki anlatım sırasına paralel olarak yenilenebilir enerji türleri ve kavramları verilmiştir (Güneş enerjisi,



hidroelektrik, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi ve biyokütle enerjisi). Yine benzer mantıkla nükleer enerji ile ilgili kavramlar Şekil 14'te bir arada incelenmişlerdir (Nükleer güç, nükleer enerji, nükleer reaktör, nükleer fizyon, nükleer füzyon). Bunu müteakiben Şekil 15'te çevre ile enerji konularının kesişim noktasını teşkil eden kavramlar verilmiştir. Şekil 16 da ise kronolojik sırayı takiben, nispeten daha yeni bir enerji türü olan güneş enerjisi ile ilgili kavramlar bir arada sunulmuştur.

Analiz gerçekleştirilirken ilgili oldukları düşünülen kavramlar aranmış, ancak bazı kavramlar grafikte gözlenebilir anlamlı sonuçlar doğurmadığından (Google külliyyatında yeterli frekansta geçmediğinden) aramadan çıkarılmışlardır. Ayrıca çok düşük düzeyde tekrar ettikleri için grafikte okunması ve yorumlanması zor olan kavramlar belirli bir katsayı ile çarpılarak okunaklılıkları artırılmıştır. Çarpılma katsayısı eğrilerin yaklaşık aynı genlikte olabilecekleri şekillerde 10'un üssü olarak seçilmiştir.

Çalışmaya başlanılmadan önce yapılan literatür taraması sonucu taranmasına karar verilen kelimeler ile tarama sonucu, birlikte tarandığı ifadelerle göre çok düşük ya da sıfır değeri verdiği için tarama dışı bırakılan kelimeler ile taramaya dahil edilen kelimelerin listesi Tablo 2'de verilmiştir.

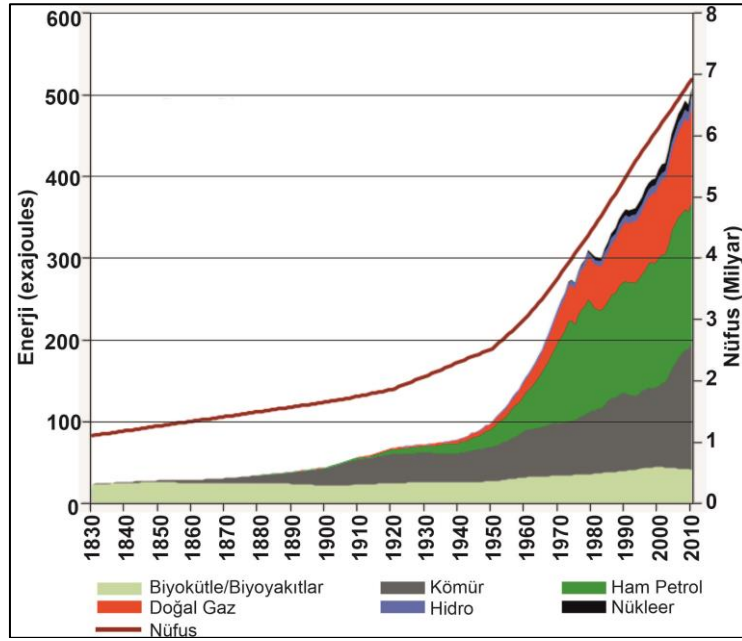
N-gram yöntemiyle değerlendirilen kavramların toplumsal/siyasal olaylarla ilişkisinin uygun anahtar kelimeler/kavramlar seçilerek yapılan bu analizin konvansiyonel yöntemlere göre oldukça sıra dışı bir analiz tekniği ve sıra dışı bir bakış açısı sunduğu görülmüş olup, bu anlamda veri madenciliği çalışmalarına katkı vermesi beklenmektedir.

#### 4. Enerji kaynakları

Enerji, işe veya ısıya dönüşebildiği gibi tersi olarak da iş ve ısıdan da enerji üretilebilmektedir. Güneş ve rüzgâr insanın farkında olmadan kullandığı, yararlandığı ilk enerji türü ve kaynağı olsa da insanoğlunun varoluşundan-günümüze kadar, bilinçli olarak, biyokütle, özellikle de bitkisel biyokütle, ısıya dönüştürmek için kullandığı ilk enerji kaynağı olmuştur. Kömürün kullanımı ise yaygın olarak sanayiye yönelik, 18. yüzyılın 2. yarısından sonra başlamıştır [24]. 19. yüzyılın 2. yarısından sonra ise petrol önemli bir enerji kaynağı olmuş ve nispeten de kömürün yerini 1965'lerden sonra almaya başlamıştır [25]. Petrol kullanımına zamanla, özellikle 1960'lardan sonra, doğal gaz da eşlik etmiştir. İkinci Dünya savaşından sonra 1970'lere kadar, yeniden yapılanma ve hızla artan verimlilik arayışlarına bağlı olarak hidroelektrik ve nükleer enerji de enerji temin-tedarik sepetine eklenmiş alternatifler olmuştur (Şekil 1). Hidroelektrik enerjinin, anlık olarak hava durumuna veya günün saatine bağlı olan güneş ve rüzgâr enerjilerinin aksine, nispeten ucuzluğu ve daha uzun sürelerle yayılan rejimi ile bir yenilenebilir enerji olmasının avantajından her daim yararlanılmıştır. Nükleer enerji bazı durumlarda askeri amaçlı gerçekleştirilmiş çalışmaların bir sonucu olarak ortaya çıkarken (ABD, İngiltere, Sovyetler Birliği, Fransa, Çin), yeterli fosil yakıt kaynaklarına sahip olmayan diğer bazı ülkeler (İsveç, Finlandiya, Fransa, Japonya ve Güney Kore) için stratejik enerji bağımsızlığı nedeniyle önemli olmuş ve bu bağlamda sektöre yönelik Ar-Ge faaliyetleri yürütülmüş, yatırımlar yapılmıştır [25].

**Tablo 2.** Çalışmaya dahil edilen ve çıkarılan kavramlar listesi.

Literatür taraması sonucu elde edilen ifadeler	Çalışmada incelenen ifadeler	Google külliyatında yeterince yer almadığı için çalışmadan çıkarılan ifadeler
Alternative energy	Alternative energy	
Betz law		Betz law
Biogas		Biogas
Biomass energy	Biomass energy	
Carbon emission	Carbon emission	
Central receiver tower		Central receiver tower
Co2 emission	Co2 emission	
Coal	Coal	
Concentrated solar power		Concentrated solar power
Concentrated solar thermal technologies		Concentrated solar thermal technologies
Conventional energy	Conventional energy	
Eco energy	Eco energy	
Energy ships		Energy ships
Fossil fuels	Fossil fuels	
Fuel oil		Fuel oil
Gasoline		Gasoline
Geothermal energy	Geothermal energy	
Green energy	Green energy	
Green house emission		Green house emission
Green house gas	Green house gas	
Heliostats	Heliostats	
Hydroelectric	Hydroelectric	
Linear fresnel		Linear fresnel
Natural gas	Natural gas	
Nuclear energy	Nuclear energy	
Nuclear fission	Nuclear fission	
Nuclear fusion	Nuclear fusion	
Nuclear power	Nuclear power	
Nuclear reactor	Nuclear reactor	
Parabolic dish	Parabolic dish	
Parabolic trough		Parabolic trough
Petroleum	Petroleum	
Photovoltaic	Photovoltaic	
Renewable energy	Renewable energy	
Schokley - quessier limit		Schokley - quessier limit
Solar drying	Solar drying	
Solar energy	Solar energy	
Solar power	Solar power	
Syngas		Syngas
Thermal energy storage		Thermal energy storage
Tidal energy	Tidal energy	
Wind energy	Wind energy	

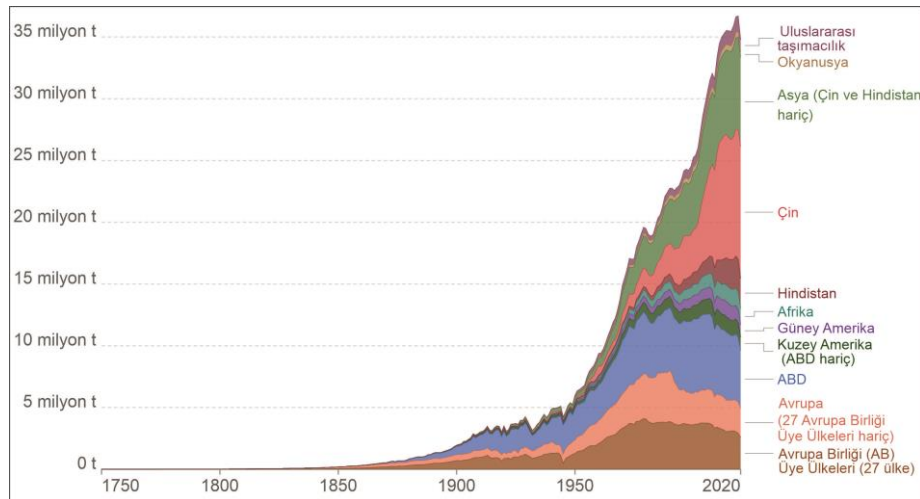


**Şekil 1.** 1830-2010 yıllarını kapsayan küresel enerji v nüfus ilişkilerini göstermektedir. Kahverengi çizgi insan nüfusu ile kıyaslamayı göstermektedir (sağ eksen) [26]

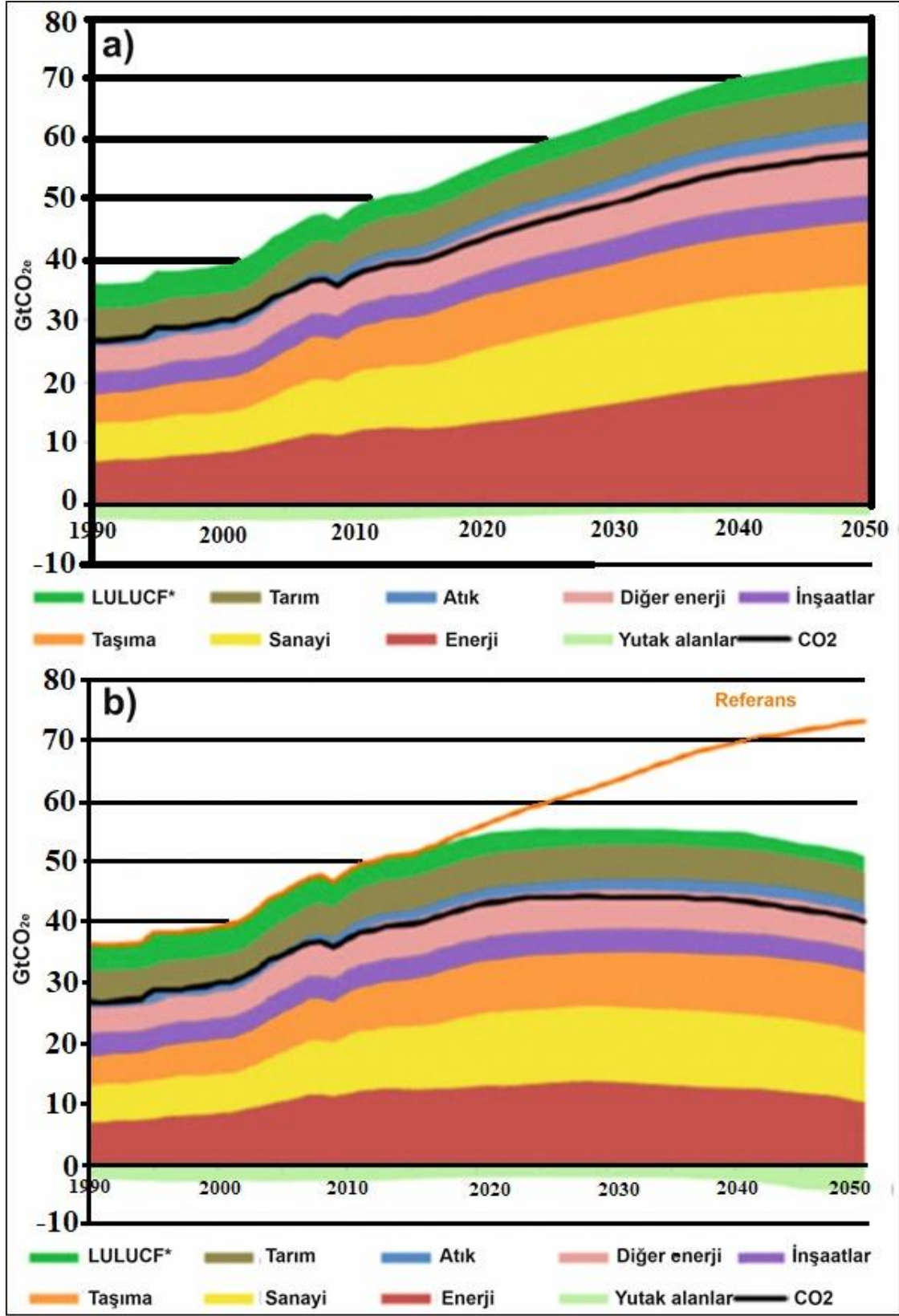
Dünyada artan enerji talebiyle birlikte yeterli ve güvenilir enerji arzı-üretimi geçen yüzyılın sonunda başlayarak bu yüzyılın en önemli sorunsallarının başında gelir. Fosil yakıtların başında gelen kömür, enerji üretiminde geçmişte en önemli yeri tutmuştur. Zamanla kömüre petrol de eşlik etmiş ancak fosil yakıtlarının en önemli dezavantajları zararlı sera gazları salınımları olmuştur (Şekil 2). Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra sera gazlarına karşı oluşan duyarlılık ile fosil yakıtlardan uzaklaşma eğilimi ağırlık kazanmıştır. 1990'lardan sonra sera gazı emisyonları enerji tedarikinde oldukça belirleyici olmaya başlamıştır. Küresel sera gazı emisyonlarının 2010'da 48,3 GtCO<sub>2</sub>'den (gigaton eşdeğer CO<sub>2</sub>'ye) 2030'da 63,1 GtCO<sub>2</sub>'ye ve 2050'de 73,6 GtCO<sub>2</sub>'ye çıkması beklenmektedir (Şekil 3a ve b, Şekil 4). Bu değer küresel olarak 3-4 °C'lık bir artış ve trajik sonuçlar doğuracak bir sıcaklık değişimi olarak görülmektedir. Oluşturulan farkındalığın da etkisiyle genel manada CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak için çalışmalar başlamış olup, bunun 2050'de sera gazı emisyonlarını 50 GtCO<sub>2</sub>'ye, dolayısıyla 2010 emisyon seviyesine düşürmesi beklenmektedir (Şekil 3b).

Fosil yakıtlarının toplumdaki yaygın kullanımı ve özümsemesi nedeniyle bir miktar geri planda kalmış olan yenilenebilir enerji teknolojileri bahse konu çevresel gelişme ve kaygıların da etkisi ve genellikle CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaya alternatif olarak görüldüğü için tekrar ciddi bir rağbet görmeye başlamıştır.

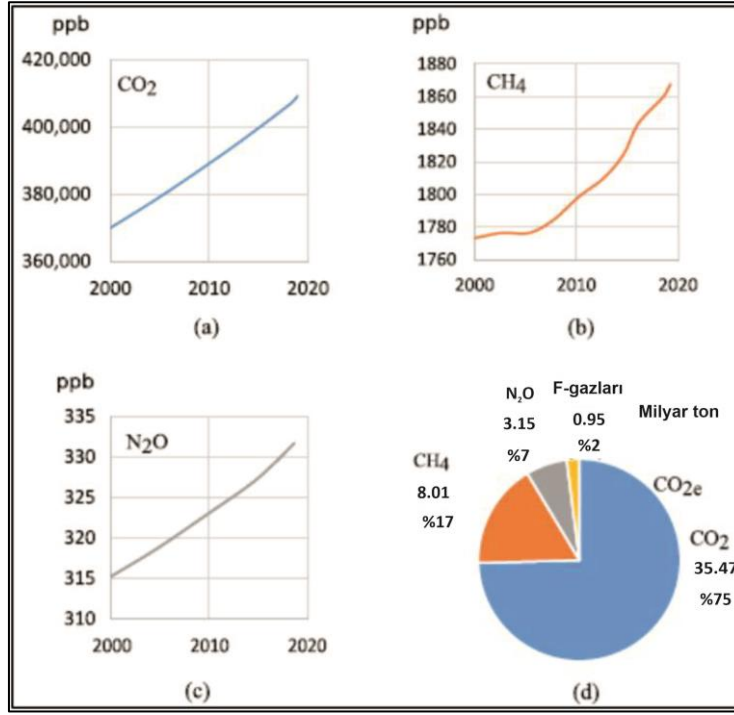
Ancak 2022 Şubat'ında Rusya'nın Ukrayna'yı işgali ile birlikte de her türlü karbon salınımı tartışmalarına rağmen fosil yakıtlar tekrar gündem olmaya da başlamıştır.



**Şekil 2.** 1750-2020 yılları arasında kapsayan, dünya bölgelerine göre küresel CO<sub>2</sub> emisyonları [27]



**Şekil 3. a)** Hali hazır koşullarda geçmiş ve 2050 projeksiyonu yapılmış sera gazı emisyonları **b)** Yapılan düzenlemelerle hedeflenen sera gazı emisyon projeksiyonu [28], \*: land use, land use change and forestry (arazi kullanımı, arazi kullanım değişimi, ormanlık alan)



**Şekil 4.** Sera gazı konsantrasyon ve emisyonları. a) CO<sub>2</sub> atmosferik konsantrasyonu, b) CH<sub>4</sub> atmosferik konsantrasyonu, c) N<sub>2</sub>O atmosferik konsantrasyonu d) milyon ton olarak CO<sub>2</sub>'e eşit emisyonlar [29]

Enerji üretimi için seçilecek yöntemleri belirleyen iki önemli kriter vardır. Birincisi enerji üretimi yapılacak alanın genişliğidir. Başka bir ifadeyle üretilecek enerji için güç yoğunluğunun yüksek olması beklentisi (Tablo 3). İkinci seçim kriteri ise güç üretim yönteminin ekonomik uygulanabilirliğidir. Bu iki kriter de yatırım tercihlerinde önemli bir rol oynar. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, dalga (tidal), biokütle veya jeotermal güç üretimleri gibi yenilenebilir enerji/güç üretimi geniş arazi alanlarına ihtiyaç duyar çünkü yenilenebilir güçlerin tümü düşük güç yoğunluğuna sahiptir (Tablo 3). Bu yüzden de fosil bazlı veya nükleer enerji üretimi, çevreci hassasiyetleri ihmal edildiğinde daha tercih edilebilir görülmektedir, en azından fiili durum böyledir.

**Tablo 3.** Farklı enerji kaynaklarının enerji yoğunlukları

KAYNAKLAR	Üretim Miktarı
Nükleer enerji üretim yoğunluğu (reaktör)	50-300MW/m <sup>2</sup>
Nükleer enerji üretim yoğunluğu (madencilik için arazi alanı, işleme, depolama vb.)	230W/m <sup>2</sup>
Kömür madenciliği güç yoğunluğu	100 W/m <sup>2</sup> -2 kW/m <sup>2</sup> yeraltında 2 kW/m <sup>2</sup> -33 kW/m <sup>2</sup> açık maden işletmesi
Petrol çıkarma gücü yoğunluğu	10-20 kW/m <sup>2</sup>
Doğal gaz çıkarma gücü yoğunluğu	10-15 kW/m <sup>2</sup>
Etanol enerjisi üretim yoğunluğu (Brezilya)	0.45 W/m <sup>2</sup>
Etanol enerjisi üretim yoğunluğu (ABD)	0.22 W/m <sup>2</sup>
Hidroelektrik enerji üretim yoğunluğu (rezervuar)	0.4-3 W/m <sup>2</sup>
Hidroelektrik enerji üretim yoğunluğu (ırmak barajları)	1-500 W/m <sup>2</sup>
Rüzgâr enerjisi üretim yoğunluğu (arazi)	1.3-7 W/m <sup>2</sup>
Rüzgâr enerjisi üretim yoğunluğu (açık deniz)	10-22 W/m <sup>2</sup>
Pv enerji üretim yoğunluğu	3-30 W/m <sup>2</sup>
Konsantre güneş enerjisi üretim yoğunluğu	25 W/m <sup>2</sup>
Dalga enerjisi üretim yoğunluğu	14-16 W/m <sup>2</sup>

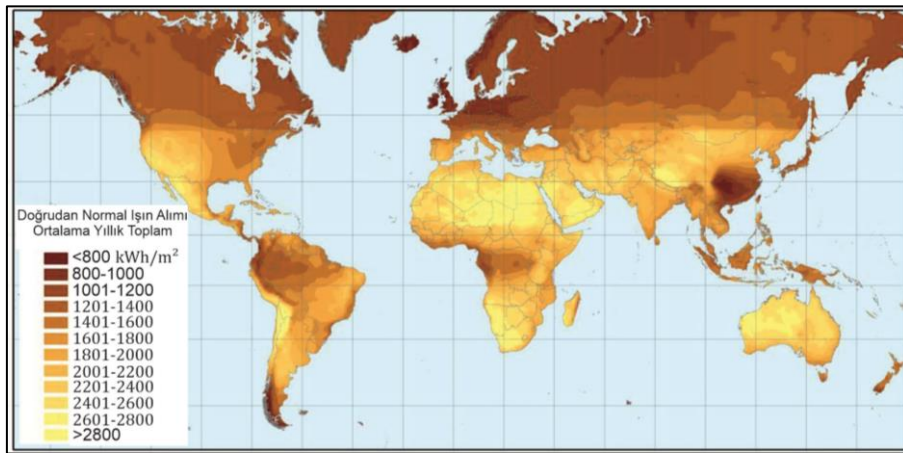
İçinde bulunduğumuz yüzyılda fosil yakıtların tükenmesinin yaklaşması ve ancak enerji talebinin giderek artması nedeniyle, yenilenebilir enerji ve yeşil teknolojilere yönelim tavsiye ve teşvik edilmektedir. Elektrik üretimi endüstriyel amaçlar için elzemdir ve güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yeşil enerji kaynaklarından elektrik üretimi düşünülmelidir. Yeşil enerji kaynaklarından elektrik üretmek ekonomik ve çevresel açıdan faydalıdır [30]. Günümüzde en yaygın yenilenebilir enerji üretim metotları, fotovoltaik, yoğunlaştırılmış güneş santralleri, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi üretimidir. En önemli alternatif enerji kaynaklarının başında ise her ne kadar üzerinde çekişmeler de olsa nükleer enerji gelmektedir.

#### 4.1. Güneş enerjisi

Fotovoltaik (PV) paneller, fotovoltaik etki sayesinde güneş ışığını doğrudan elektrığe dönüştürür. Çok pahalı paneller için dönüşüm verimi %10 ile en fazla %20 arasında değişmektedir. Teorik dönüşüm limiti (Shockley-Queisser limit) ise %31'dir. Güneş enerjisi yoğunluğu coğrafik lokasyonlara bağlı olarak 80-280 W/m<sup>2</sup> arasında değişir. Güneye bakan bir panelden gelen ortalama güç bu nedenle %20x110 W/m<sup>2</sup> =22 W/m<sup>2</sup> olarak verilir. Her bir kişiye yaklaşık 10 m<sup>2</sup> tahsis edildiği ve 12 saat güneş ışığının olduğu varsayıldığında, kişi başına günde yaklaşık 2.5 kWh verim sağlayacaktır [31]. Dolayısıyla bu sistemin enerji üretiminin sınırlı olması ciddi bir dezavantajdır. Bu yüzden de fotovoltaik alternatif olarak bir elektrik jeneratörüne bağlı bir buhar türbinini çalıştıran suyu ısıtmak için güneş ışınımını yoğunlaştırmak için aynalar veya mercekler kullanmak da güneş enerjisinden yararlanma metotları içinde cazibeye sahip olmuştur.

Üzerinde bazı kısıtlar bulunsada güneş enerjisinin avantajları, onu dünyadaki en gelecek vaat eden teknoloji yapmıştır. Bu nedenle iklim değişikliğini hafifletmek için özellikle güneş enerjisine yönelik Ar-Ce çalışmaları ve geliştirilen teknolojiler kilit bir teknoloji olarak görülmektedir [32]. Geçmişte güneş enerjisinden yararlanılmasına dair pek çok örnek olmasına rağmen güneş enerjisini başka formlara dönüştürerek kullanma çabaları 19. yüzyılda başlamış ve güneş enerjisine dayalı buhar motorları o dönemde hayata geçirilmiştir. Ancak bu yöntem çok ekonomik görülmediği için güneş enerjisinden yararlanmaya yönelik yeni teknoloji arayışları da aynı dönem içinde artmaya başlamıştır [33]. Bugünkü manada güneş enerjisinden sıcak su üretilme teknolojisinin temelleri 20. yüzyılın başlarında gelişmeye başlamıştır [33]. Bu bir yönüyle de güneş enerjisi (solar enerji) depolama örneği olarak görülebilir. Bu dönemde güneş enerjisinden sıcak su elde edilmesi ve evlerin ısıtılmasında kullanılmaya başlanmıştır. O zamana kadar büyük şehirlerdeki binaların ısıtılmalarında kömüre dayalı kaynaklı kazanlar kullanılmaktaydı. Güneş enerjisinin büyük ölçekli uygulamaları, bilimsel birikimdeki artışın devam etmesine rağmen, 1. ve 2. Dünya Savaşları döneminde sekteye uğramıştır. Buna rağmen bahse konu dönemde de bilhassa güneş ısıtıcıları ve güneş kolektörleri alanında pek çok patent alınması dikkat çekicidir. Bu yıllarda alanın önde gelenleri ABD ve Japon mucitleriydi. İlk tip güneş enerjisine dayalı su ısıtıcılarının üretimi 1960'larda başlamıştır. Bu tür sistemler ancak güneş ışığının aktif alındığı dönemlerde çalışabildiği için, sisteme destekleyici unsur olarak rüzgâr enerjisi de kullanılmaya başlanmıştır. 1973'teki petrol kriziyle birlikte fosil yakıtlardaki fiyat artışları alternatif enerji kaynaklarına olan ciddi yönelimin sebebi olmuştur.

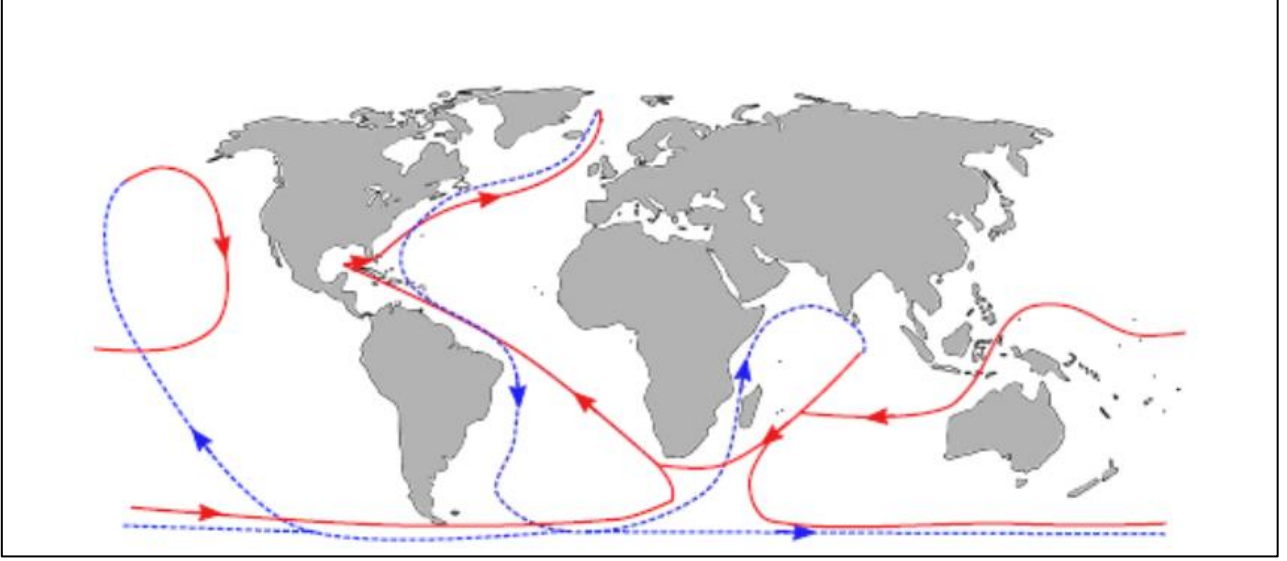
Güneş enerjisi teknolojilerinin kullanımı sınırlayan en önemli unsur tesislerin kurulacağı yerlerin yıl boyu güneş alma potansiyeli, dolayısıyla coğrafi ve fiziksel koşullardır. Artan enerji talebi düşünüldüğünde küresel ölçekte potansiyel alanların arayışı da artmıştır. Bu bağlamda 50 K ve 50 G enlemleri arasında kalan bölge, yersel istisnalar olmakla birlikte, en uygun alanlardır (Şekil 5).



**Şekil 5.** Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi potansiyelinin tahmini. Dünya ölçeğinde yıllık direkt normal irradyasyon ((DNI) (kW/m<sup>2</sup>/a. [34'dan alınmıştır].



Dünya'ya yıllık toplamda ortalama 170.000 TW güneş ışığı düşmektedir. Ancak, düzensiz doğası nedeniyle bu gücün yüksek bir verimlilikle değerlendirilmesi kolay olmamaktadır. Doğası gereği güneş enerjisi geniş toplama alanları ve büyük depolama kapasiteleri gerektirir. Bu dezavantajın tropikal okyanuslar tarafından giderilebileceğini ileri sürün görüşler artmaktadır [29]. En kabul gören görüşlerden biri yerkürenin termosifon özelliğidir. Şöyle ki: Dünya yüzeyinin %71'ini kapsayan okyanuslar tropik bölgelerde güneş ışığını emerek üst katmanlarında 25°C'ye kadar ısınır. Ekvator kuşağından gelen ılık yüzey suları, kutuplara doğru akar ve hem arktik hem de Antarktika buzunu eritir. Ortaya çıkan soğuk sular, döngüyü tamamlayarak ekvatora büyük bir derinlikte geri döner (Şekil 6). Böyle bir gezegen termosifonu muazzam bir güç doğurur. Ancak bu teknoloji henüz geliştirme aşamasında olup üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Başka bir çalışma da ise çok uluslu bir konsorsiyum güneşli Güney Avrupa, Orta doğu ve Kuzey Afrika ülkelerinde konsantre güneş enerjisi tesislerini rüzgar çiftlikleri ile güçlendirilerek Kuzey Avrupa'ya yüksek voltajlı doğru akım iletim hatlarıyla enerji ulaştırmaya hedeflemektedir [31]. Bu tür özgün projeler geçen yüzyılın sonunda tartışılarak 21. yüzyılda devam eden AR-GE çalışmalarıdır.



**Şekil 6.** Gezegensel termosifon. Yüzey akıntıları (katı çizgi) ve derin akıntılar (kesikli çizli). Okyanusal döngünün detayları Rahmstorf (2002)'de bulunabilir [29].

#### 4.2. Hidroelektrik enerji

Hidroelektrik enerji üretimi küçük ölçekte düşünüldüğünde, 1882'lerde başlamış ve hızlı bir şekilde Alpin ülkelerinde, İskandinavya ve Birleşik Devletlerde uygulanmıştır. Smil [35]'e göre Dünya'nın büyük barajlarının arkasındaki rezervuarlar neredeyse 2 İtalya büyüklüğünde bir alanı kaplamaktadır. Dünyanın en büyük hidroelektrik santrali yaklaşık 3 W/m<sup>2</sup> verimliliğe sahiptir. Buna karşın ortalama hidroelektrik santralleri 1.5 W/m<sup>2</sup> üretime sahiptir, ki bu değerler küresel enerji talebini karşılamaktan oldukça uzaktır.

Bununla birlikte en umut verici yenilenebilir enerji üretim yöntemleri arasında yalnızca hidroelektrik santrali sabit bir oranda güç sağlayabilirken, diğer yenilenebilir enerji santralleri, güneş ve rüzgâr koşullarındaki günlük veya mevsimsel değişiklikler nedeniyle enerji girdilerinde büyük değişikliklere tabidir. Bu enerji üretim yöntemleri ancak yeterli bir enerji depolama yönteminin seçimiyle hidroelektrik enerji yöntemiyle eşit derecede önemli bir kriter haline gelecektir [31]. Mevcut enerji depolama teknolojileri, hidroelektrik pompalı depolama, basınçlı hava enerji depolama, pil enerji depolama, volan enerji depolama, sıcak su depolama, faz değişim malzemeleri depolama, güçten gaz/sıvıya (hidrojen, metan, metanol vb.) enerji depolama, termokimyasal enerji depolama, fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz), biyokütle ve biyodizel yöntemlerini içerir. Enerji depolamaya yönelik yeni teknoloji arayışları özellikle de 1990'lardan beri yoğun sonrasında şekilde sürmektedir. Pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, elektrik için mevcut tek büyük ölçekli depolama teknolojisidir. Bunlar en olgun depolama teknolojisini temsil ederler, ancak gelişme potansiyelleri coğrafi imkanlarla sınırlıdır. Basınçlı hava enerji depolaması için de önemli miktarda deneyim mevcuttur.

### 4.3. Hidrojen Gazı

Hidrojen gazı, özellikle yakıt hücreleriyle bağlantılı olarak, bir yakıt olarak büyük umut vaat etmektedir. Kara taşıtlarına, deniz taşıtlarına ve ayrıca büyük hava ve uzay taşıtlarına güç vermede ve endüstriyel ve evsel ısı ve elektrik üretim ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir rol oynayabilir [29]. Hidrojen ayrıca büyük miktarlarda enerjiyi uzun mesafeler boyunca taşımak için bir araç olarak da fırsatlar sunar.

Hidrojen gazı elde edilmesinin geçmişi, Montgolfier kardeşlerin yaptığı sıcak su balonunu uçurdukları 1783'e kadar uzanır. Hidrojen çevresel bir kirlilik oluşturmadan üretilebilen en cazip yeşil enerji çeşitlerinin başında gelir. Üretimi ve kullanılmasına yönelik uygun teknolojilerin geliştirilmesiyle birlikte muhtemelen, mümkün olan en çevre dostu yakıt olacaktır. Bu enerji kaynağı üzerinde çalışmalar hala yoğun olarak devam etmektedir. 2016 yılında, sürdürülebilir havacılık yakıtları üretmek amacıyla deniz suyundan hem hidrojen hem de karbondioksit çıkarmak için enerji gemilerinin kullanılması olasılığı tartışılmıştır. Son yıllarda, ABD Deniz Araştırma Laboratuvarı, geleneksel jet yakıtının deniz suyundan çıkarılan hidrojen ve karbondioksitten üretilen bir sıvı yakıt ile değiştirilmesi olasılığını da araştırmaya başlamıştır.

### 4.4. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi de günlük veya mevsimsel değişiklikler nedeniyle enerji girdilerinde büyük değişikliklere tabi bir enerji çeşididir. Bu da rüzgâr enerjisinin zayıf noktasıdır. Modern rüzgâr türbininin gelişimleri, 1970'lerde dönme çapı 17 m olan ve 75 kW güce sahip olanlarla başlamıştır. Akabinde ise 125 m çaplı olan ve 5 MW gücünde olan türbin geliştirilmiştir [36]. Bu günlerde ise General elektrik 250 m yarıçaplı ve 12 MW rüzgâr türbini yapılabileceğini öngörmektedir. Yıllık ortalama 7-7.5 m/s rüzgar hızına sahip rüzgarlı bölgeler 400-500 W/m<sup>2</sup> yoğunlukta enerji üretir. Rüzgâr ile üretilebilecek enerji miktarı, belirli bir rüzgâr akımındaki kinetik rüzgâr enerjisinin dönüşümü, en fazla 16/27 (%59) verimlilikle yakalanabileceğini belirten Betz yasası ile sınırlıdır. Halihazırdaki gerçek güç dönüştürme verimliliği %30-40 arasındadır. Dolayısıyla teknolojik olarak daha kat edilecek epey yol gözükmetedir. Ayrıca, mevsimsel rüzgâr değişimleri, tipik olarak, nominal türbin çıkışının (kapasite faktörü) yalnızca %30-35'inin yıllık olarak yakalanmasına izin verir. Sonuç olarak, en yoğun şekilde planlanmış rüzgâr çiftlikleri 15 W/m<sup>2</sup>'ye kadar bir güç yoğunluğuna ulaşır ve daha tipik sahaların yoğunluğu 5-7 W/m<sup>2</sup>'dir [36].

Açık deniz sahaları daha yüksek ortalama rüzgâr hızlarına sahiptir ve bu nedenle açık deniz rüzgâr türbinleri ise 10 ile 22 W/m<sup>2</sup> arasındaki güç yoğunluklarına ulaşmaktadır. Teknolojik olarak alınacak hala yol olmasına rağmen rüzgâr gücü (wind power) en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynağıdır. 2011'in sonuna kadar dünya çapında 197 GW'a ulaşmıştır. Sadece 2010'da rüzgâr gücüne dayalı enerji kaynağı %23.6 altı büyümüştür [36]. Dünya genelinde kurulan tüm rüzgâr türbinleri yılda Terawatt-saat (TWh) seviyesinde elektrik üretmiştir. Bu gücüyle dünya genelinde 50 milyar \$ ve 670 000 kişiye istihdam sağlamıştır [36].

### 4.5. Biyogaz

Biyogaz, sürdürülebilir ve verimli temiz elektrik gücü nedeniyle tercih edilen ve endüstriyel tesislerde şebeke bağlantısı ve tarife garantisi ile elektrik üretimi için birincil yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak değerlendirilebilir. Şu anda, yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi yaklaşık %8'dir. Bu oran biyoenerji kaynaklarından elektrik üretmek için yeni ve verimli teknikler uygulanarak iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

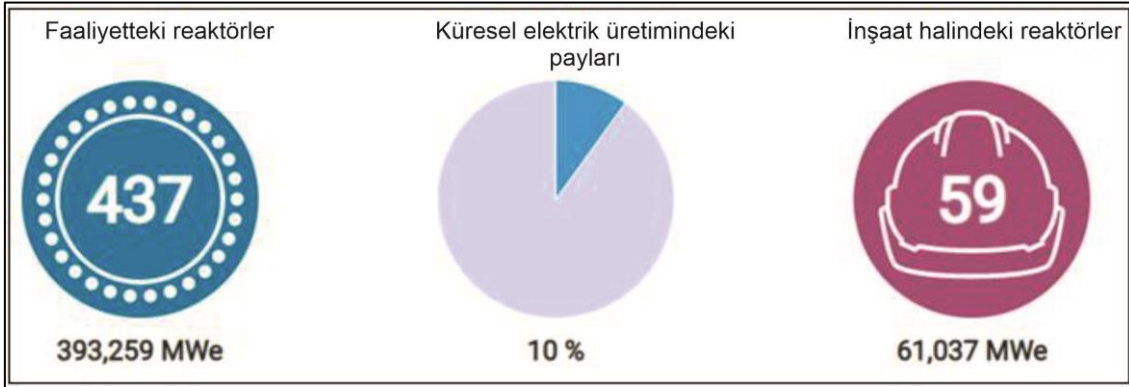
### 4.6. Jeotermal Enerji

Alternatif enerji kaynaklarından bir diğeri ise jeotermal enerjidir. Jeotermal enerjiden yararlanma da çeşitli kullanım farklılıkları ile insanlığın ilk dönemlerine kadar gitmektedir [4,5]. Dünyanın derinliklerindeki sıcaklık akımının bir sonucu olarak açığa çıkan jeotermal enerji kaynakları yüzeyde kaplıcalar, sıcak su havuzları şeklinde gözlenmektedir ve insanlar bu ortamları yemeklerini pişirme, banyo yapma ve ısınma amaçlı olarak kullanmışlardır [5,37]. Termal suların enerji üretiminde kullanımı ise 19. yüzyılın ikinci yarısında, Kuzey İtalya'nın Tuscany bölgesindeki Larderello bölgesinde bulunan o dönemde bor üretimi için kullanılan kaplıcada jeotermal enerji üretimi için tesis kurulması ile başlamıştır. Akabinde yine aynı sahada ilk elektrik üretimi de 1904'de gerçekleştirilmiştir [37]. Kapsamlı şekilde termal kaynakların evlerin ısıtılmasında ve seralarda kullanılması ise 1920'de İzlanda'da olmuştur. Günümüzde de İzlanda jeotermal enerjiden faydalanan ülkelerin en başında gelmektedir. 1958'lerde ise jeotermal enerjinin kullanılmasında İzlanda ve İtalya'ya Yeni Zelanda da katılmıştır.

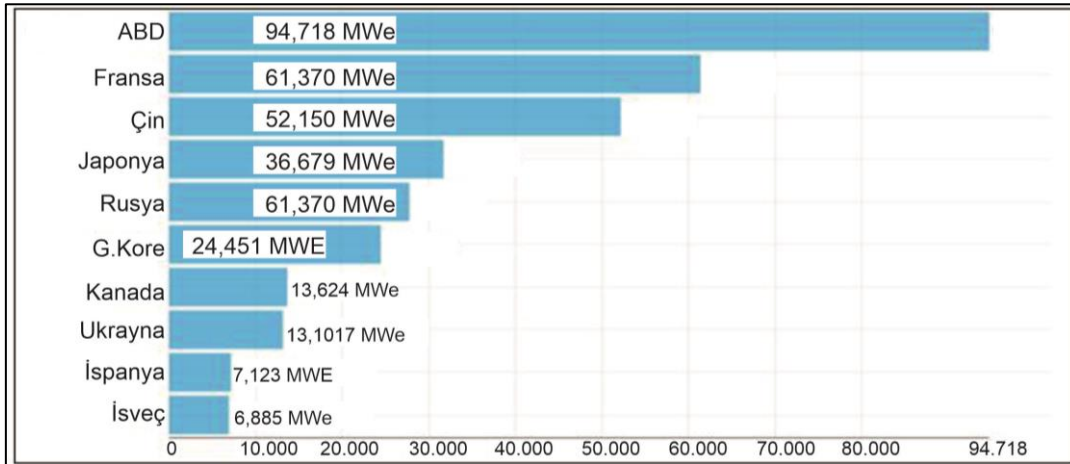


#### 4.7. Nükleer Enerji kaynakları

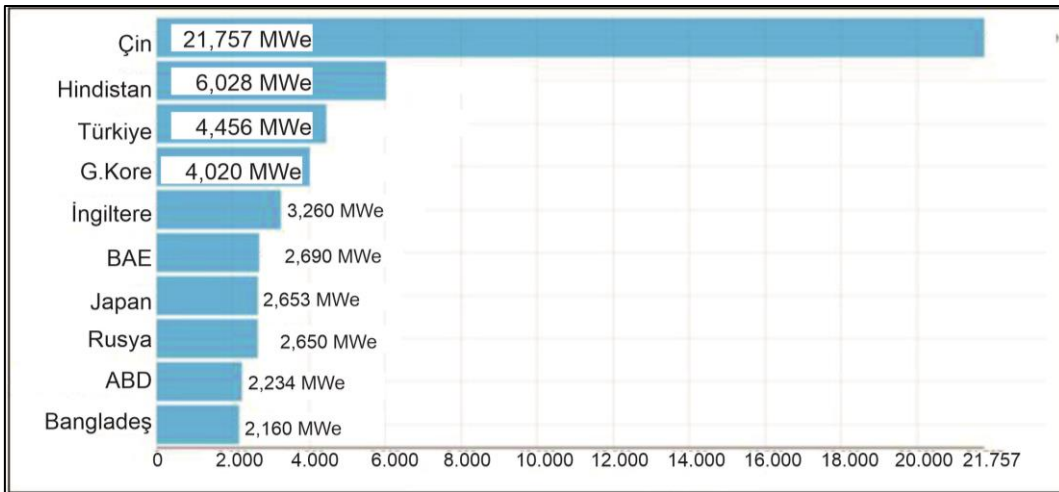
Nükleer enerji sistemleri hali hazırda 3. nesile evrilmiştir. İlk nesil santraller 1950 ve 1960'ta prototip olarak kurulmuştur. 2. nesil santraller ise ticari olarak tasarlanarak 1970'lerde kurulmuştur. O dönemde kurulan santrallerin bir kısmı hala faaliyettedir. Günümüzde kurulan, ülkemizdeki Akkuyu Nükleer Santrali de dahil, 3. nesil santralleri ise III/III+ jenerasyon olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde 437 nükleer santral halen faaliyette bulunmakta, bunlar toplam 393,259 Mwe elektrik üretimiyle dünya enerji üretiminin %10'unu karşılamaktadırlar (Şekil 7-10). 61,037 MWe elektrik üretimi sağlaması planlanan 59 adet nükleer santralin inşası da halihazırda devam etmektedir (Şekil 7-10). Nükleer santraller birçok çevresel çekinceye rağmen dünya enerji üretiminde artan miktarda bir yere sahip olmuşlardır.



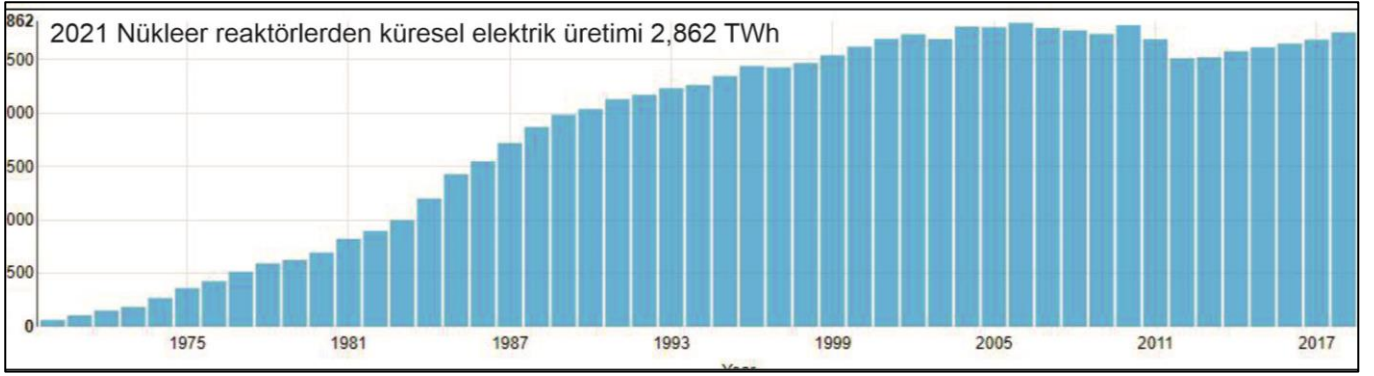
Şekil 7. Nükleer santrallere ait güncel veriler [38]



Şekil 8. Toplam Çalıştırılabilir reaktör net kapasitesi (MWe) (İlk 10) [38]



Şekil 9. Toplam İnşası devam eden reaktör net kapasitesi (MWe) (İlk 10) [38]

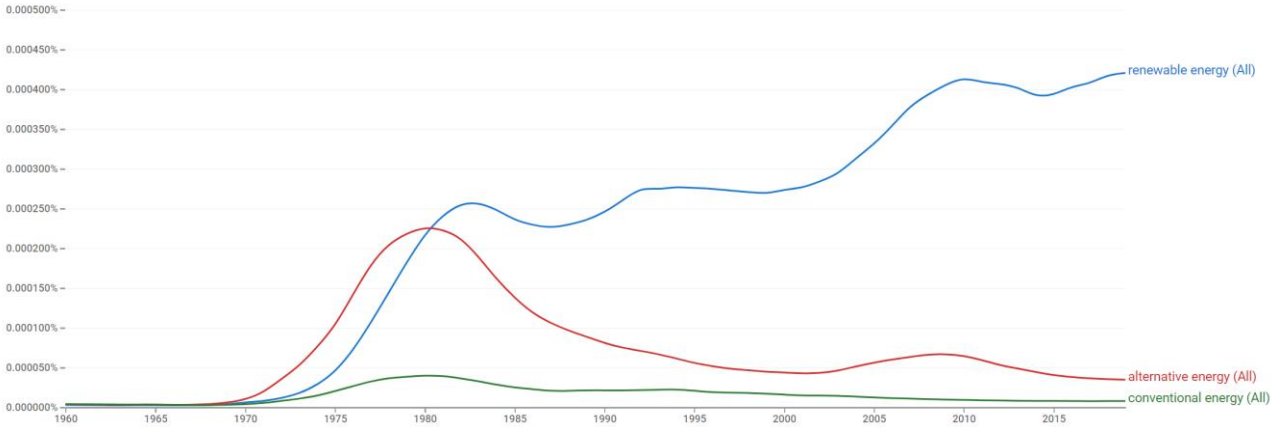


Şekil 10. Yıllara göre nükleer santrallerden küresel ölçekte elektrik üretimi miktarı [38]

#### 4 Bulgular ve Yorumlar

Literatürde enerji türleri ile ilgili sıklıkla karşılaşılan terimler arasında. “renewable energy”, “conventional energy”, “alternative energy” kavramları gelmektedir. Bu çalışmada genel enerji türlerinin öncelikli olarak ele alınması uygun bulunmuştur. Kavramların n-gram analiz sonucu Şekil 11’de görülmektedir.

Grafik incelendiğinde enerji kaynaklarının alt başlık altındaki türlerinin kullanımlarının 1965’lerden sonra kullanılmaya başladığı, yenilenebilir enerji kavramının ise zamanla bir artış eğilimine sahip olduğu görülmektedir. Alternatif enerji ve konvansiyonel enerji 1970 ile 1990 yılları arasında 1980 yılı zirve olacak şekilde bir çan eğrisi geometrisi göstermektedir. Bu tarihsel dönem ilgili kavramların en çok gündemde olduğu ve üzerinde birçok tartışmalar yapıldığı döneme karşılık gelmektedir. Yenilenebilir enerji kavramı da 1970-1980 arasında benzer geometriyi göstermekle birlikte 1980’lerin sonrasında alternatif enerji içinde yenilenebilir enerji kavramı önem kazanmış ve alternatif enerjinin yerini de yenilenebilir enerji almıştır (Şekil 11).



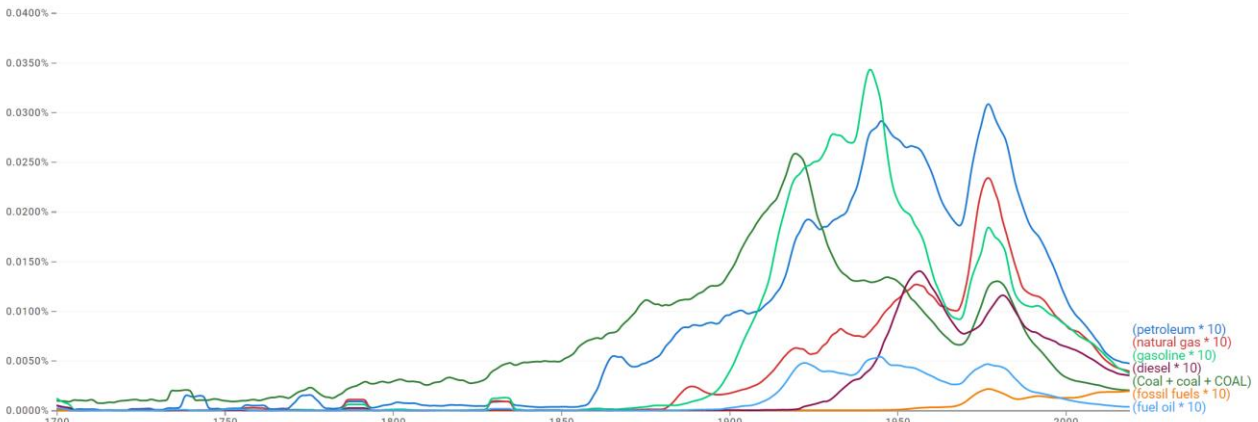
Şekil 11. Modern enerji Kavramlarının Tarihi Seyri

Kronolojik olarak ilk karşımıza çıkan yakıt türleri fosil yakıtlardır. En bilinen fosil yakıtlar arasında yer alan kömür (coal), petrol (petroleum), doğal gaz (natural gas), fosil yakıtlar (fossil fuels) kavramlarına ait analiz Şekil 12 ‘de görülmektedir.

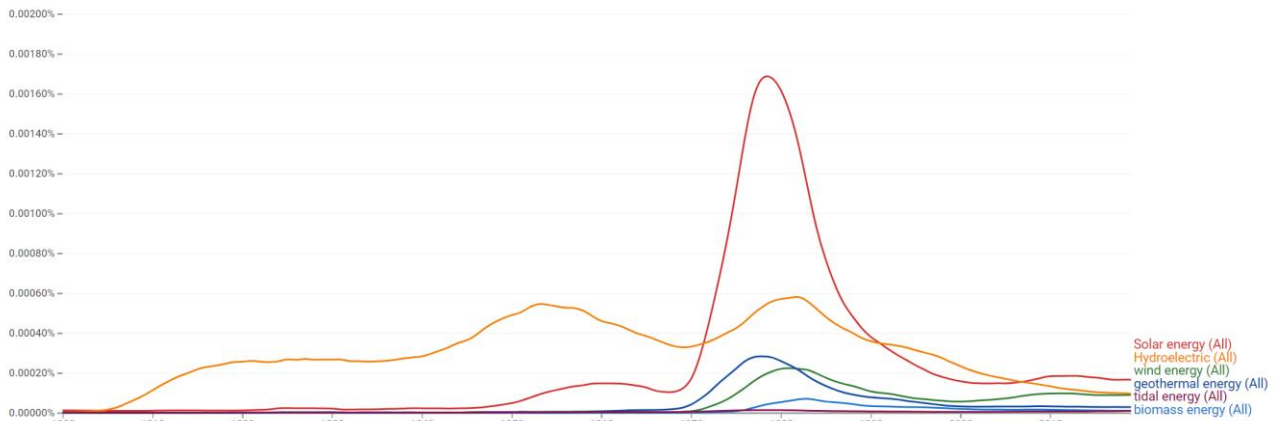
Bu grafikte kömürün 18. yüzyılın 2. yarısından sonraki kullanımı ve sosyal hayattaki yer buluşuyla orantılı olarak literatür sıklığı gösterdiği net bir şekilde görülmektedir [6,24]. Aynı şekilde petrolün de (petroleum) 19. yüzyılın 2. yarısından sonra sosyal hayat içinde yer aldığı 1950’lere kadar da artan bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. 1970 petrol krizi ile petrolün literatürdeki kullanım dikkat çekici olarak artmakta, 1980’lerden sonra ise kullanım sıklığında bir düşüş çevresel hassasiyetlerle ilişkili olarak azalmaktadır (Şekil 12). Doğal gaz, yukarıda da belirtildiği gibi 1960’lardan sonra petrolle gündeme gelmeye başlıyor ki n-gram grafiği de (Şekil 12) bunu teyit ediyor, 1970’lerin sonunda doğal gaza ilgi artıyor ve 1980’e doğru ise zirveye ulaşıyor (Şekil 12). Grafikte yaklaşık olarak 1950 yılında benzin, 1960 yılında ise mazot ve doğal gaz kelimeleri ilk zirvelerini yapıyorlar. 1980 tüm enerji kaynakları için kullanım sıklığında yeni bir zirveye karşılık gelmektedir. Bunda 1980’li yıllarda alternatif enerji kaynaklarının gündemde olmasının yanı sıra n-gram analizinde kullanılan enerji/yakıt kaynaklarının birbirleri ile ilişkili tartışıldığı dönemler olması etkili olmuştur. Farklı anahtar

kelimelerle yapılan n-gram analizinde görülen bir diğer dikkat çekici unsur ise fosil yakıtlar (fossil fuels) kavramıdır. Bu kavramın da literatürde ciddi manada yer bulması çevresel konuların sosyal hayatta önemli bir yer tuttuğu 1980'ler ve sonrasında karşılık gelmektedir. Kavram 1980'lerden sonra literatürde giderek artan bir kullanım sıklığı gösterirken, özellikle 1980'lerde diğer konvansiyonel yakıtlarda rastlanan zirve fosil yakıtlar için de geçerli olmuştur (Şekil 12).

Yenilenebilir enerji ve alt grupları için oluşturulan n-gram analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 13), hidroelektrik enerji kavramının (hydroelectric power) literatürde yer bulması 1900'lerin başına karşılık gelmektedir. İlk hidroelektrik enerjinin 1882'üretildiği ve akabinde hızlı bir şekilde yayıldığı düşünüldüğünde n-gram grafiğinin de bu olayla uyumluluğu görülmektedir (Şekil 13). Güneş enerjisi (solar energy) kavramının da neredeyse hidroelektrik enerji kavramı gibi 1900'lerin başlarında literatürde görülmesi de dikkat çekicidir. Tabii ki seçilen kavramların bu çalışmada kastedilen manadan farklı olarak literatüre girmiş olma ihtimali de göz önünde bulundurulmalı ve ihtiyaç duyulması durumunda ilgili kavramı konu alan derin analiz teknikleri kullanılmalıdır. Ancak bu çalışma kavramlarla ilgili olarak derin bir analizden ziyade farkındalığı öncelendiği için bu tür analizlere çalışmada yer verilmemiştir. Şekil 13'ten anlaşılacağı üzere diğer alternatif/yenilenebilir enerji kaynakları gibi güneş enerjisi kavramı da 1980'lerde dikkat çekici bir seviyede kullanım sıklığı göstermektedir (Şekil 13).



Şekil 12. Fosil yakıt kavramları n-gram analizi



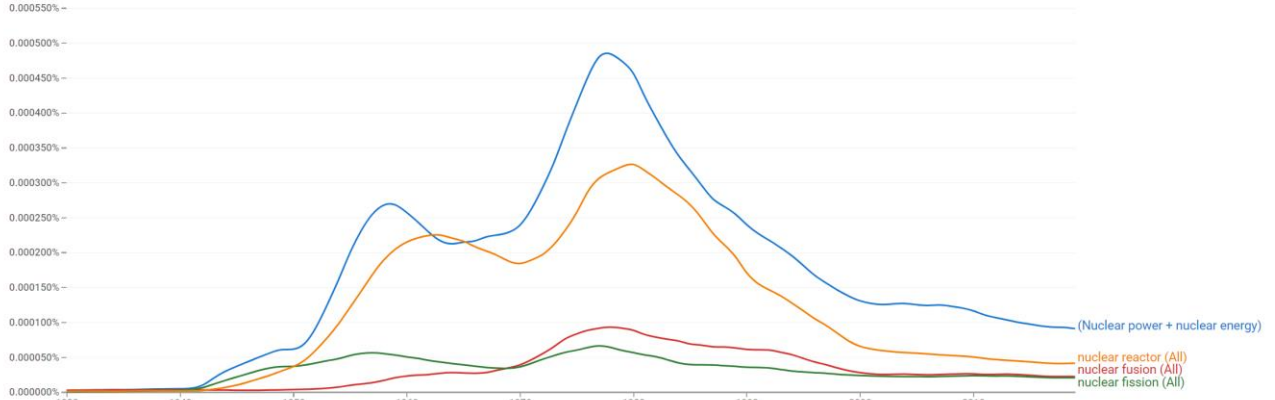
Şekil 13. Yenilenebilir enerji ve alt gruplarına ait n-gram analiz grafiği

Dalga enerjisi (tidal energy) kavramı Şekil 13'ten de anlaşılacağı üzere 1960'ların sonunda literatüre girmiştir. Bu yıllar alternatif enerji arayışlarının gündemde olduğu yıllar olup, grafik de bu olguyu desteklemektedir (Şekil 13).

Her ne kadar jeotermal enerji (geothermal energy) kullanımına dair kayıtlı veriler 19. yüzyılın 2. yarısından sonra rastlanmış olsa da [37,39] n-gram analizine göre ise 1960'lardan sonra dikkat çekmeye başlamıştır (Şekil 13). Bu tarih ise İtalya, İzlanda ve Yeni Zelanda'da jeotermal kaynakların enerji amaçlı kullanımının

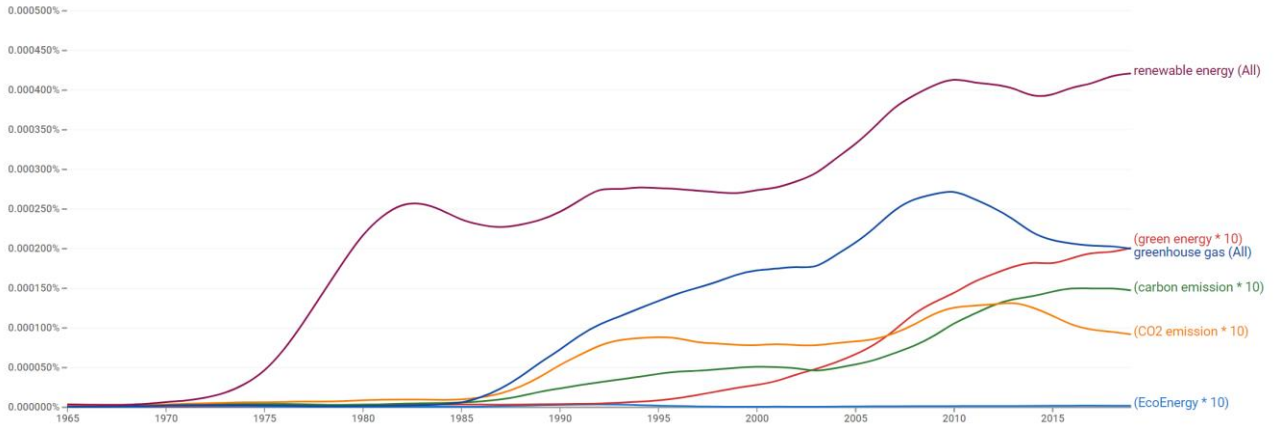
yaygınlaştığı yıllara denk gelmektedir [37]. Diğer kavramlar görece daha düşük düzeyde geçme sıklığına sahiptir ve ayrıntılar Şekil 13'de görülmektedir.

Belki en genç alternatif enerji kaynaklarının başında nükleer enerji (nuclear energy) gelmektedir. Türkçe'de nükleer enerji olarak kullanım bulsa da İngilizce 'de daha çok "nuclear power" olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden n-gram analizinde "nuclear energy" ve "nuclear power" anahtar kelimeleri birlikte incelenmiştir (Şekil 14). Özellikle 20. yüzyılın ortalarına doğru temel bilimlerin gelişimi ile de paralel olarak nükleer enerji ve nükleer silah konusu dünya gündeminde yer bulmaya başlamıştır [40]. Şekil 14 incelendiğinde 1940'lardan itibaren nükleer enerji kavramına ilişkin bir yükselmenin olduğu görülmektedir. Bu dönem, İkinci Dünya Savaşı sonlarına doğru yapılan nükleer silah tartışmaları ve Japonya'ya karşı kullanılan atom bombası ile kolaylıkla ilişkilendirilmektedir. 1950'lerle birlikte Soğuk Savaşın başlaması literatürde nükleer (enerji, silah) kavramı etrafındaki tartışmaların sürekli bir artış eğiliminde olduğuna işaret etmektedir. Grafikte nükleer enerji ve nükleer reaktör kavramlarının eş değişim göstermeleri analizin doğruluğunu destekler niteliktedir. Fosil yakıtların rezervlerinin artık tükenmeye yüz tutması ve bunun aksine de küresel enerji talebinin ise karşılama gücünün artmasıyla birlikte yeni arayışlara yönelinmiştir. Soğuk Savaş yıllarında, 1953'te ABD Başkanı Dwight David Eisenhower, bütün Dünya ülkelerinin nükleer bilgi ve malzeme birikimlerini uluslararası bir kuruluşun gözetiminde birleştirmelerini önermişti. Bu öneri üzerine 62 ülkenin katılımıyla 1957'de Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) kurulmuştur. Bu yıllar n-gram analizinde de nükleer enerji (nuclear energy, nuclear power) kavramının literatürde kullanım sıklığı ile de teyit edilmektedir (Şekil 14). Bahse konu dönemler içindeki yükselimin bir nedeni olarak da 3. Dünya Savaşı'nı başlatacak ve insanlığı nükleer bir faciannın eşiğine götürecek bir gerilimin karşılığı olan 1962 Küba Füze Krizi [33] görülebilir. Eisenhower'ın 1964'te dillendirdiği "Barış için atom" sloganı o sırada ABD müttefiki olan İran'ın nükleer enerji girişimi başlatmasını teşvik etmiş, ancak 1979'daki İran İslam Devrimi'nden sonra ABD bu konuda sürekli İran'ın üzerine gitme ve köşeye sıkıştırma politikası izlemiştir ki n-gram analizinde bahse konu dönemler kullanım sıklığının artış gösterdiği yıllara karşılık gelmektedir (Şekil 14). 1960-1970'li yıllar nükleer enerji, nükleer silah ve ilişkili kavramların çok yoğun gündem oluşturduğu yıllar olarak karşımıza çıkmaktadır [33]. Örneğin 1972'deki ABD ile SSCB arasında SALT-I adı verilen Anti-Balistik Füze Sistemlerini Sınırlandıran Antlaşma [34] ve diğerleri ile bu süreç devam etmiştir. Bunlar genel olarak stratejik silahların nitel ve nicel olarak sınırlandırmasını öngören antlaşmalardır [33]. Tüm bu olayları grafikteki değişimlerle de az veya çok kendini hissettirmektedir. 1970'lerle birlikte nükleer enerji kavramının literatürde kullanma sıklığının artışı, literatürde bu konuların Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Antlaşması (NPT)'den dolayı sürekli gündemde olmasının yanı sıra büyük bir enerji arzını sekteye uğratan Petrol Krizi ile örtüşmektedir. Petrolün uluslararası ilişkilerde bir koz ve bir anlamda silah gibi kullanılması gerginliği artırırken diğer yandan petrol yerine nükleer enerjinin bir alternatif olarak tartışılması ile birlikte nükleer enerji hep gündemde kalmıştır. Nükleer enerjinin toplumda yer bulması, kullanımı ile birlikte insanlık, üçü 1990 öncesi biri de 2011'de olmak üzere 4 büyük nükleer santral kazasıyla karşılaşmıştır. Bu kazalar toplumda nükleer enerjiye karşı ciddi bir hassasiyetin de oluşmasını tetiklemiş, n-gram grafiğindeki yukarı doğru eğilime de katkı vermiştir (Şekil 14) [35]. 1966'lar ile 1990'lar arası nükleer enerji grafiğinin bir çan eğrisi görünümünü aldığı görülmektedir (Şekil 14). 1980'lerden sonra nükleer enerjiye yönelik literatürdeki kullanım sıklığının düşmesi, toplumda oluşan çevresel hassasiyetlere bağlı olarak nükleer enerjiye yönelik isteksizliklerin artması, hatta bazı nükleer enerji reaktörlerinin de kapatılmaya başlanmasıyla uyumluluk göstermektedir (Şekil 14). Bu dönem yukarıda da belirtildiği gibi tüm alternatif enerji kaynaklarına rağbet ve yeni enerji kaynaklarının arayışıyla da örtüşmektedir. 1990'lı yıllarla birlikte enerji güvenliği, çevre duyarlılığı ile paralel bir şekilde literatürde arttığı yıllardır [35] (Şekil 14). Bu dönemlere yönelik olarak daha detay analizler için uygun anahtar kelimelerle derin analizler de yapılabilir. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi bu çalışmayla yenilenebilir enerji olgusunun n-gram analizi ile retrospektif değerlendirilmesine yönelik farkındalık oluşturmak amaçlandığı için derin/detay analize bu çalışmada yer verilmemiştir.



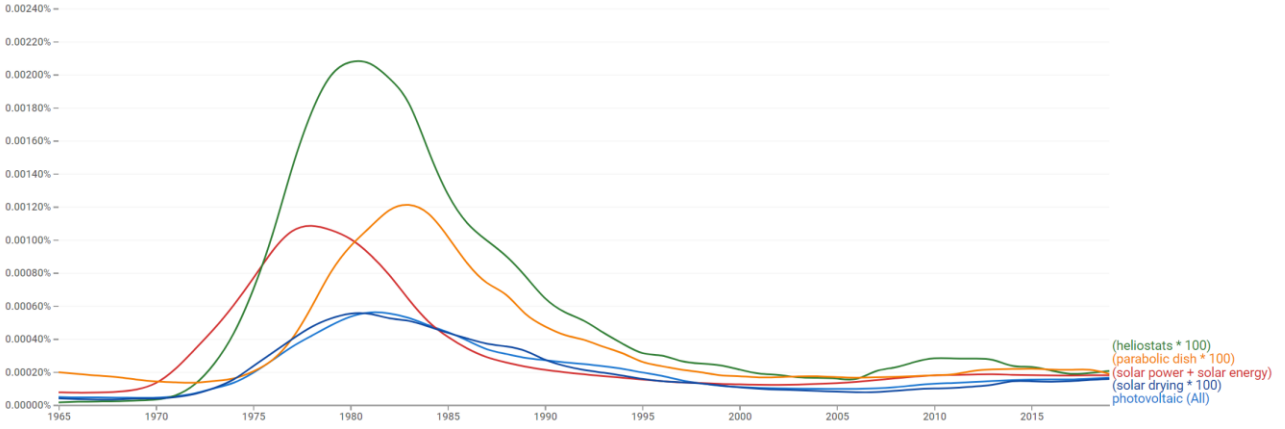
Şekil 14. Nükleer enerji kavramlarının n-gram ile analizi

Enerji ile ilgili önemli konulardan biri de kullanılan enerji kaynaklarının çeşit ve miktarlarının çevreye olan etkileridir. Çevresel bilincin artması ile sürdürülebilirlik, küresel ısınma, yeşil enerji ve karbon ayak izi gibi kavramlar literatürde yer bulmaya başlamıştır. Enerjinin çevre ile ilişkisini temel alan bu kavramlar da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu durum 1990'larda iklim ve çevre dostu anlaşmaların gündemde çok yer tutması ile uyumluluk göstermektedir. Nükleer enerji kavramının 1990'lardan sonra düşüşü ise nükleer enerji ile ilgili tartışmaların çevre ve güvenliği ön plana çıkararak kavramlara bırakmasıyla ilgili olarak görülebilir (Şekil 14, 15). Nükleer enerji popülerliğini kaybederken yenilenebilir enerji (renewable energy) ise 2000'li yıllarda yıldızı parlayan olmuştur (Şekil 14, 15). Şekil 15'de 1970'lerden sonra literatürde görülmeye başlayan sera gazı ve CO<sub>2</sub> emisyonu terimlerinin birbirine paralel şekilde yenilenebilir enerji kaynakları ile uyumluluğu da anlamlı görülmüştür. CO<sub>2</sub> emisyonunun yerini 1992'den sonra sera gazlarının almış olduğu da dikkat çekici bir şekilde belirginleşmektedir. Grafik incelenirken okunabilirlik adına bazı kavramların 10 ile çarpıldığı göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 15. Çevre ile ilgili kavramların n-gram analizine ait grafik. Analiz edilen kavramların birlikte kolay değerlendirilebilmesi için "green energy", "carbon emission", "CO<sub>2</sub> emission" ve "EcoEnergy" kavramları 10 ile çarpılmıştır.

Çalışmada güneş enerjisi ve ilgili kavramlar ayrıca bir n-gram analizine tabi tutulmuştur (Şekil 16). Elde edilen grafikte daha önceki ilgili kavramların n-gram analiziyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Neredeyse 1970-1990 yılları arasındaki tüm nükleer ve alternatif enerji kaynaklarıyla paralellik göstermiştir. Şekil 16'da kullanılan güneş enerjisi teknolojilerinin de güneş enerjisi kavramıyla paralellığı net olarak görülmektedir. Fotovoltaik ve güneş enerjisi kavramları literatürde ilgili diğer kavramlara göre daha sık geçmektedir.



**Şekil 16.** Güneş enerjisi ve ilgili kavramlara ait n-gram analizi. Analiz edilen kavramların birlikte kolay değerlendirilebilmesi için “heliostats”, “parabolic dish” ve “solar drying” kavramları 100 ile çarpılmıştır.

## 6- Sonuçlar

N-gram destekli olarak gerçekleştirilen bu çalışmayla; yenilenebilir, alternatif, nükleer enerji kavramları ve bu kavramlarla ilişkili olan ve/veya anlamsal birliktelik gösteren kavram ve/veya kelimelerin literatürdeki kullanımları, kullanım sıklıkları belirlenmiştir. N-gram grafiklerinde kavramların kullanım sıklıkları ve bu sıklıklara bağlı iniş/çıkışları sosyolojik, psikososyolojik, politik ve/veya jeopolitik perspektifinde değerlendirilmiştir. N-gram yöntemi kullanılarak incelenen kavramların toplumsal/siyasal ve dahi askeri olaylarla ilişkisinin irdelenmesi konvansiyonel yöntemlere göre oldukça sıra dışı bir analiz tekniği ve sıra dışı bir bakış açısı ortaya koyduğu görülmüştür. Dolayısıyla yapılacak bilimsel çalışmalarda, n-gram yönteminin araştırmacılara oldukça kolaylık sağlayacağı, hedef dönem ve/veya kavramların tespitinde yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışma dolayısıyla n-gram yönteminin iyi bir veri madenciliği aracı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, n-gram ile yenilenebilir enerji, alternatif enerji, nükleer enerji ve ilişkili kavramlar öncelikli olarak incelenmiş ve elde edilen verilerin de ışık tutması ile bu kavramların çevre bilinci, sürdürülebilirlik, küresel ısınma, yeşil enerji ve karbon ayak izi gibi kavramlar ile ilişkilerine yönelik de değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde seçilen kavramların tarihsel süreç ve gerçekliklerle örtüştüğü görülmüştür. Özellikle yenilenebilir enerji kavramının 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra ciddi bir popülerliğe sahip olduğu, konvansiyonel enerji kaynaklarının ise bu dönemden sonra azalan bir ilgiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Nükleer enerji kavramının da yenilenebilir diğer enerji türleri ile ilişkili bir kullanım sıklığı gösterirken özellikle çevre hassasiyetinin artışıyla birlikte öneminin düştüğü de n-gram yöntemi ile belirlenmiştir.

## Yazar Katkı Oranları

N-gram yönteminde kullanılan kavramların seçimi, literatür taramaları ve yorumlanmasında Alaaddin Vural ağırlı katkıyı vermiştir. N-gram süreçlerinin yürütülmesinde sonuçlarının yorumlanmasında Nuri Ural ve Alaaddin Vural katkı vermiştir. Elde edilen verilerin sosyal, siyasal olaylarla ilişkilendirilmesinde ise Ali Çiftçi katkı vermiştir.

## Çıkar Çatışması

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.



## Kaynakça

- [1] Ural, M. N., Vural, A., & Çiftçi, A. (2020). N-Gram Analysis of Nuclear and Alternative Energy Sources and Historical and Political Course. *Euroasia Summit Congress on Scientific Researches and Recent Trend-6, May*, 582–586.
- [2] Vural, A., Kaya, S., Başaran, N., & Songören, O. T. (2009). *Anadolu Madenciliğinde İlk Adımlar*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, MTA Kültür Serisi-3.
- [3] Kaya, S., Başaran, N., Songören, T., Vural, A., & Kayadibi, Ö. (2010). Evaluations Related To Mining Archeology (Geo-Archeology) in Amasya City. *7th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology*.
- [4] Vural, A., & Kaygusuz, A. (2022). *Gümüşhane İli Jeotermal Enerji ve Gazlı-Mineralli Su Potansiyelinin Araştırılması Üzerine Bir Değerlendirme*. 1618–1645.
- [5] Ural, M. N., Vural, A., & Çiftçi, A. (2020). Conceptual Analysis of the Change in the Historical Process in Thermal Tourism. *Journal of International Health Sciences and Management*, 6(12), 67–73.
- [6] Çiftçi, A., Vural, A., & Ural, M. N. (2020). N-Gram Analysis of Industrial/Industrial Revolution Relation with Coal and Related Keywords. *Euroasia Summit Congress on Scientific Researches and Recent Trend-6, May*, 587–591.
- [7] McLuhan, M. (1962). *The Gutenberg Galaxy-The Making of Typographic Man*. University of Toronto Press, Scholarly Publishing Division.
- [8] McLuhan, M. (1964). Understanding Media: The Extensions of Man. İçinde *Encyclopedia of New Media*. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.4135/9781412950657.n237>
- [9] Vural, A., Ural, N., & Çiftçi, A. (2020). Değerli Metallerin Sosyal / Siyasal / Ekonomik Olaylarla İlişkisinin N-gram Yöntemi İle Değerlendirilmesi. *Social Mentality and Researcher Thinkers Journal*, 6(29), 247–257.
- [10] Ural, M. N., Vural, A., & Çiftçi, A. (2020). Analysis of Rare Earth Elements (REE) in the Literature by Using N-gram Method and Comparison with Social/ Political/ Economic Even. *Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences*, 6(24), 369–379.
- [11] Ural, M. N., Vural, A., & Çiftçi, A. (2019). Analysis of Rare Earth Elements (REE) in the Literature by Using N-gram Method and Comparison with Social/Political/Economic Events. *4. Uluslararası GAP Sosyal Bilimler Kongresi*, 135–144.
- [12] Çiftçi, A., Vural, A., & Ural, M. N. (2020). Analysis of Environmental and Health Related Concepts with N-Gram Method. *5.Uluslararası Sağlık Bilimleri ve Yönetimi Kongresi*.
- [13] Çiftçi, A., Ural, M. N., & Vural, A. (2019). Investigation of the Relationship between Base Metal (Pb-Zn-Cu) and Social/Political/Economical Events by N-gram Analysis. *4. Uluslararası GAP Sosyal Bilimler Kongresi*, 116–124.
- [14] Vural, A., & Çiftçi, A. (2021). Analysis of Raw Material Supply-Demand Relationship Using N-Gram: Chrome Mine Example. *Euroasia Journal of Social Sciences and Humanities*, 8(1), 1–9.
- [15] Vural, A., Ural, M., & Çiftçi, A. (2020). Evaluation of Historical Development of Some Concepts Related To Development And Environmental Issues with N-Gram Analysis. *International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Symposium- V. November 28-29, 2020 / Zonguldak, Turkey*.
- [16] Reddy, D. K. S., & Pujari, A. K. (2006). N-gram analysis for computer virus detection. *Journal in Computer Virology*, 2(3), 231–239. <https://doi.org/10.1007/s11416-006-0027-8>
- [17] Huang, Y. C., Lin, H., Hsu, Y. L., & Lin, J. L. (2012). Using n-gram analysis to cluster heartbeat signals. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6947-12-64>
- [18] Vural, A., Çiftçi, A., & Ural, M. N. (2021). Kıymetli Taşlar ve Sömürgecilik. *73. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, 237–

241.

- [19] Ural, M. N., Vural, A., & Çiftçi, A. (2020). Conceptual Development Analysis of Health Tourism Based on “N-Gram”. *5.Uluslararası Sağlık Bilimleri ve Yönetimi Kongresi, 9-11 Temmuz 2020, Kırşehir/Türkiye*.
- [20] Vural, A., & Çiftçi, A. (2021). An Analysis of Some Concepts Related to Environmental Issues and Development by N-Gram. *Euroasia Journal of Social Sciences & Humanities, 8(19)*, 18–28. <https://doi.org/10.38064/eurssh.158>
- [21] Vural, A., Ural, M. N., & Çiftçi, A. (2020). N-Gram Analysis of Raw Material Supply-Demand Relationship: In Case of Chromium. *International Black Sea Coastline Countries Symposium-5*, 60–61.
- [22] Çiftçi, A., Vural, A., & Ural, M. N. (2021). Analysis of Some Concepts Related to the Environment and Health with the N-Gram Method. *Journal of International Health Sciences and Management, 7(13)*, 47–54. <https://doi.org/10.48121/jihsam.796465>
- [23] Vural, A., Ural, M. N., & Çiftçi, A. (2019). N-gram Yöntemi İle Değerli Metallerin Sosyal/Siyasal/Ekonomik Olaylarla İlişkisinin Değerlendirilmesi. *4. Uluslararası GAP Sosyal Bilimler Kongresi*, 125–134.
- [24] Vural, A., Ural, M. N., & Çiftçi, A. (2022). Analysis of Energy Raw Material Coal , Industrialization and Industrial Revolution Phenomena with N-gram. *Journal of Investigations on Engineering & Technology, 5(1)*, 11–20.
- [25] Sornette, D., Kröger, W., & Wheatley, S. (2018). New ways and needs for exploiting nuclear energy. İçinde *New Ways and Needs for Exploiting Nuclear Energy*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97652-5>
- [26] Mearns, E. (2014). *Enerji and Mankind part 3*. <http://euanmearns.com/energy-and-mankind-part-3/>
- [27] Ritchie, H., & Roser, M. (2022). *CO<sub>2</sub> emissions*. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [28] Kitous, A., Keramidas, K., Vandyck, T., & Saveyn, B. (2016). *GECO 2016. Global Energy and Climate Outlook. Road from Paris. EUR 27952 EN*. <https://doi.org/10.2790/89230>
- [29] da Rose, A. V., & Ordonez, J. C. (2022). Fundamentals of Renewable Energy Processes. İçinde *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-05615-5>
- [30] Sinharoy, A., & Lens, P. N. L. (2022). Renewable Energy Technologies for Sustainable Development. İçinde *Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future*. Springer. <https://doi.org/10.1002/adsu.201800109>
- [31] Platzer, M. F., & Sarigul-Klijn, N. (2021). *The Green Energy Ship Concept Renewable Energy from Wind Over Water*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58244-9\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58244-9_25)
- [32] Moukhtar, I., El Dein, A. Z., Elbaset, A. A., & Mitani, Y. (2021). *Solar Energy*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61307-5>
- [33] Alexopoulos, S., & Kalogirou, S. A. (2021). Solar Thermal Energy. İçinde *Fundamentals of Renewable Energy: C. i*. Springer. <https://doi.org/10.1201/9781003245643-5>
- [34] Solargis, G. S. A. (2. . ) S. resource data: (2020). *Solar resource maps of World*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>
- [35] Smil, V. (2008). *Energy in Nature and Society*. MIT Press .
- [36] Bundschuh, J., Chen, G., & Chandrasekharam, D. (2017). *GEOHERMAL, WIND AND SOLAR ENERGY APPLICATIONS IN AGRICULTURE AND AQUACULTURE*. Taylor & Francis.
- [37] Stober, I., & Bucher, K. (2013). *Geothermal Energy, From Theoretical Models to Exploration and Development*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13352-7>



- [38] World\_Nuclear\_Association. (2022). *facts-and-figures/reactor-database*. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/reactor-database.aspx>
- [39] Rolker, J., Schill, E., Stober, I., Schneider, J., Neumann, T., & Kohl, T. (2015). Hydrochemical characterisation of a major central European heat flux anomaly: the Bürchau geothermal spring system, Southern Black Forest, Germany. *Geothermal Energy*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0021-1>
- [40] Cohen, B. L. (1990). *The Nuclear Energy Option: An Alternative for the 90s*. New York: Plenum Press.
- [41] Arı, T. (2011). *Uluslararası İlişkiler ve Dış Politika* (9. baskı). MKM Yayınları.
- [42] Sönmezoglu, F. (2005). *Uluslararası Politika ve Dış Politika Analiz* (4. baskı). Filiz Kitapevi.
- [43] Ediger, V. (2019). An integrated review and analysis of multi-energy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Procedia*, 156(September 2018), 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.073>



## Beyin Bilgisayar Arayüzü ve Geleceği

Önder AYDEMİR<sup>1</sup> 

(Alınış / Received: 30.11.2022, Kabul / Accepted: 28.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Beyin Bilgisayar Arayüzü

EEG

Sinir Bilimi

**Öz:** İnsan beyninin işleyişi henüz tam olarak keşfedilmemiş esrarengiz yapısı ile araştırmacıların odağında olan bir organdır. Günümüzde tıptan başka mühendislikten eğitime, spordan finansa kadar birçok disiplinde yapılan araştırmalarda dikkate alınmaktadır. Özellikle kamuoyunda “düşünce gücü” olarak adlandırılan literatürdeki ismi ile beyin bilgisayar arayüzleri geleceğin teknolojileri arasında gösterilmektedir. Bu teknoloji insanların sadece düşünceleri ile bilgisayar gibi elektronik cihazları kontrol edebilmelerini olanaklı hale getiren sistemlerdir. Öyle ki, insanlar düşünceleri ile yazı yazabilmekte, bir nöroprotezi hareket ettirebilmektedir. Bu çalışmada bu teknolojinin veri kaydetme yaklaşımları, dünya literatüründe üretilen araştırma sayılarının analizi ile gelecekteki çalışma sahaları hakkında sonuçlar sunulmuştur.

## Brain Computer Interface and Its Future

### Keywords

Brain computer interface

EEG

Neuroscience

**Abstract:** The functioning of the human brain is an organ that is in the focus of researchers with its mysterious structure that has not yet been fully explored. Today, it is taken into consideration in researches conducted in many disciplines, from medicine to engineering, education, sports to finance. Brain-computer interfaces are shown among the technologies of the future, especially in the literature, which is called "thought power" in the public. This technology is systems that make it possible for people to control electronic devices such as computers with just their thoughts. So much so that people can write with their thoughts and move a neuroprosthesis. In this study, the data recording approaches of this technology, the analysis of the research numbers produced in the world literature and the results about the future work areas are presented.

### 1. Giriş

Teknoloji insanların faydasına olan gelişmelere verilen isimdir. Sanayi devrimi ile kitlelere fayda sağlayan üretim teknolojileri ve ulaşım makineleri üretilirken son 30 yıldır çoğunlukla kişisel ihtiyaçlara fayda sağlayan akıllı uygulamalar da geliştirilmektedir [1-3]. Bu uygulamalar daha çok yapay zeka algoritmalarını kullanarak geçmişteki verileri kullanarak ya gelecekteki olasılıksal durumları tahmin etmekte ya da verilerden anlam çıkararak kullanım kolaylığı sağlamaktadırlar. Son 20 yıldır popülerliğini günden güne arttıran ve kamuoyunda düşünce gücü olarak isimlendirilen beyin bilgisayar arayüzleri (BBA) ise en basit hali ile kişilerin sadece düşünceleri ile bilgisayar gibi elektronik cihazları kullanmalarını olanaklı hale getiren sistemlerdir [4], [5]. Bu

<sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

çalışmada BBA'ların çalışma prensipleri ve çeşitleri ile bu teknolojinin geleceği hakkında açıklamalar gerçekleştirilecektir.

## 2. İnsan-Bilgisayar Arayüzü

İnsanlar teknolojik cihazları daha çok kas sistemleri ile kullanırlar. Bir telefonu, bilgisayarı veya televizyonu el kasları ile kontrol ederler. Bunlardan başka ses komutu ile çalışan telefonlar, tablet uygulamaları veya akıllı ev uygulamaları, video tabanlı çalışan kullanıcının el, ayak veya yüz hareketlerini algılayarak çalışan sistemler de geliştirilmiştir. Yine insan vücudundan istemli kas hareketi ile kaydedilen elektromiyogram (EMG) [6], elektroensefalogram (EEG) [7] ve elektrookülogram (EOG) [8] tabanlı elektronik cihazlarda üretilmeye devam etmektedir. Bahsi geçen ve insandan alınan girdi verileri ile çalışan elektronik cihazlara “insan-bilgisayar arayüzü (IBA)” veya bir başka yaygın kullanımı ile “insan-makine arayüzü” denilmektedir. Girdi işareti EEG gibi beynin ürettiği nöral aktivite ise bu uygulamaların özel adı “beyin-bilgisayar arayüzü (BBA)” veya “beyin-makine arayüzü” olarak adlandırılmaktadır [9]. IBA sistemlerinin performansı kullanılan girdi işaretinin işaret gürültü oranına doğrudan bağlıdır. Tüm bunlar içerisinde en küçük işaret gürültü oranına sahip olanı mikrovoltlar mertebesinde genliğe sahip olan EEG'dir. EMG ve EOG işaretleri ise milivoltlar düzeyinde sinyallerdir. Araştırmacılar EEG ölçüm tekniği ile kullanıcıların mimik hareketleri veya göz hareketleri sırasında ortaya çıkan kas sinyallerini kaydederek bir IBA uygulaması geliştirerek bu uygulamaları BBA uygulaması olarak tanımlamaktadırlar ki bu doğru bir tanımlama olmamaktadır. Her ne kadar sinyal EEG gibi saç derisinden kaydediliyor olsa da aslında girdi işareti beynin ürettiği nöral aktivite değil, nöral aktiviteye gürültü olarak eklenen EMG/EOG sinyalidir. Dolayısıyla bu tarz uygulamalar BBA olarak değil IBA olarak tanımlamak daha uygun olacaktır.

## 3. Beyin Bilgisayar Arayüzü

BBA'lar insanların sadece düşünceleri ile bilgisayar gibi elektronik cihazları kontrol edebilmelerine imkan sağlayan sistemlerdir. 1990'lı yılların ilk çeyreğinde [9] adından söz ettirmeye başlayan bu teknoloji ilk yıllarında ALS hastalığından muzdarip kişiler için yani beyni sağlıklı olan felçlilerin hayatlarını kolaylaştırmak için ortaya çıkmıştır. Böyle kişilerin sadece düşünceleri ile çevreleri ile iletişim kurmalarını sağlayabilecek yazışma uygulamaları, robotik bir kolu kullanarak beslenme uygulaması veya bir tekerlekli sandalyeyi kontrol ederek mobilizasyon uygulamaları önerilmiştir. Laboratuvar ortamında elde edilen başarılı sonuçlar bu sistemlerin sadece engelli bireylerin değil, aynı zamanda sağlıklı insanların da kullanabileceği uygulamalar geliştirilebileceği fikrini kuvvetlendirdi [10-12].

BBA'lar beynin nöral aktivitesini kaydeder, yapay zeka algoritmaları ile çözümler ve kullanıcının uygulama komutları arasından hangisini düşündüğünü tespit ederek ilgili elektronik cihazı sadece düşünceleri ile kontrol etmelerine olanaklı hale getiren sistemlerdir. Bu sistemlerin verinin kaydedilmesi, ön işleme, öznelik çıkarma ve sınıflandırma olmak üzere 4 alt işlem adımları vardır [13]. BBA'larda verilerin kaydedilmesi adımı beynin nöral aktivitesi çoğunlukla 3 farklı paradigma ile kaydedilmektedir. Bu paradigmalarda avantaj ve dezavantajları ile aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

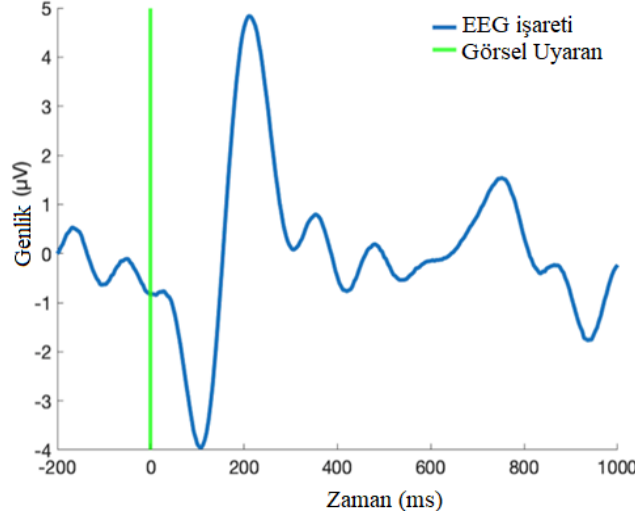
### 3.1. Motor Hayaline Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzleri

Motor hayali; herhangi bir fiziksel motor aktivite yapmadan kol veya ayak hareketi gibi bir motor hareketin hayal edilmesidir. Yapılan araştırmalar insanların aynı motor hareketini hayal ettiklerinde beynin aynı nöral bağlantıları kullandığını tespit etmişlerdir. Buradan hareketle, her ne kadar aynı motor hayaline dayalı nöral aktiviteler birbirine yüzde yüz oranında benzemese de özünde benzer örüntüleri barındırdığı ve bu örüntülerin sayısal işaret işleme ve yapay zeka algoritmaları ile tespit edilebileceği gösterilmiştir. Bu sistemler motor hayaline dayalı beyin bilgisayar arayüzleri (MHD-BBA) olarak tanımlanmıştır [14]. Tekerlekli sandalye, robotik kol, ayak protezi ve harekete dayalı bilgisayar oyun uygulamaları en yaygın MHD-BBA'lardandır [15-17]. Tamamen düşünceye (hayale) dayalı olduğundan monitör gibi ek bir paradigma aparatına ihtiyaç duymaması en önemli avantajı iken, nöral aktivite örüntülerinin kişiden kişiye farklılık gösterebilmesi genel geçer bir modelin üretilmemesine neden olması da en önemli dezavantajı olarak görülmektedir.

### 3.2. P300 Sinyallerine Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzleri

İnsan beyni duyu organlarından gelen girdileri işler ve vücut için komut veya sonuç çıktıklarına dönüştürür. Duyu organları beklenmedik bir anda bir algılamaya yaptığında insan beyni bu algılamaya yaklaşık 300 milisaniye sonra ilk tepkisini EEG işaretlerinde oluşan pozitif bir genlik artışı ile cevap vermektedir. Literatürde bu durum uyarılmış potansiyeller (*ing. evoked potential*) ya da P300 sinyali olarak isimlendirilir. Daha özel hali ile bu isim uyarı alan duyu ile isimlendirilir. Örneğin; eğer uyarı alan duyu ile geldiyse görsel uyarılmış potansiyeller, duyma ile geldiyse işitsel uyarılmış potansiyeller olarak tanımlanır. EEG işaretlerinde ortaya çıkan örnek bir görsel uyarılmış potansiyel Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu şekilde yeşil düşey çizgi görsel uyarının geldiği anı mavi

ise EEG işareti göstermektedir. Görüldüğü gibi görsel uyarandan yaklaşık 300 ms sonra EEG işaretinde pozitif yönde bir artış ortaya çıkmaktadır. Beynin hemen her sağlıklı birey için gösterdiği bu davranış prensibi BBA'lar için de bir girdi olarak kullanılmaktadır. Özellikle bilgisayar monitörü aracılığı ile P300 tabanlı heceleme dayalı BBA'lar yüksek performansı ve genel geçer avantajlarından dolayı sık tercih edilmektedir. Diğer bir önemli avantajı ise görsel uyarılmış potansiyeller için sadece oksipital bölgedeki nöral aktivitenin uygulama için yeterli olacağı bilinmesidir.



**Şekil 1.** EEG işaretlerinde ortaya çıkan örnek bir görsel uyarılmış potansiyel

P300 heceleyci, kullanıcının P300 uyarılmış potansiyelini kullanarak herhangi bir kas aktivitesi olmadan bilgisayar ekranında harfleri veya diğer hedefleri seçerek çevreleriyle iletişim kurmalarına izin veren en umut verici ve önemli BBA uygulamalarından biridir [18]. Genellikle, harflerin ve diğer karakterlerin bir klavyeyi simüle eden bir matriste görüntülediği klasik 2 boyutlu satır-sütun paradigmasını kullanır. Söz konusu uygulamaya ait bir görsel Şekil 2'de verilmiştir.

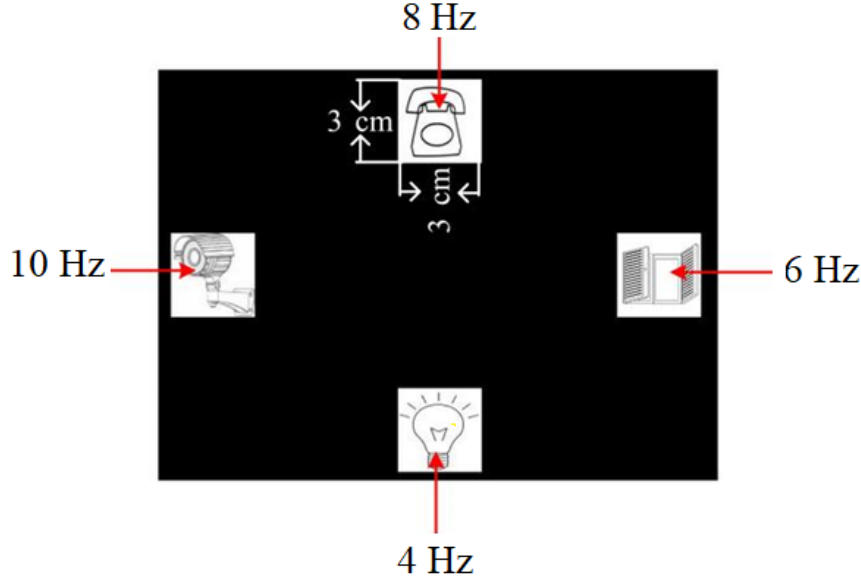


**Şekil 2.** Klasik satır-sütun paradigması

Satırlar ve sütunlar rastgele sırayla dönüşümlü olarak yanıp sönerken, kullanıcı istenen harf veya karaktere (hedef olarak da adlandırılır) odaklanır. İlginç bir şekilde, kullanıcı istenen harf veya karakterin yanıp sönmeye başladığında, yanıp sönmeye (uyaran) başladıktan yaklaşık 300 milisaniye (ms) sonra beyin pozitif elektriksel yanıtı (P300 bileşeni olarak da adlandırılır) ortaya çıkar [19], [20]. P300 heceleyci, P300 bileşenlerini inceleyerek hedefi ve hedef olmayan öğeleri belirler. P300 tabanlı BBA'ların en önemli dezavantajı ise ani uyarı sağlayan paradigmanın zamanla ezberlenmesinden dolayı beyin tespit edilebilecek düzeyde bir P300 sinyali üretilmemesi ve BBA'nın performansının zamanla düşmesidir. Her şeye rağmen araştırmacılar bu dezavantajları minimize etmek için yeni yöntemler önermektedirler.

### 3.3. Durağan Durum Görsel Uyarılmış Potansiyellere Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzleri

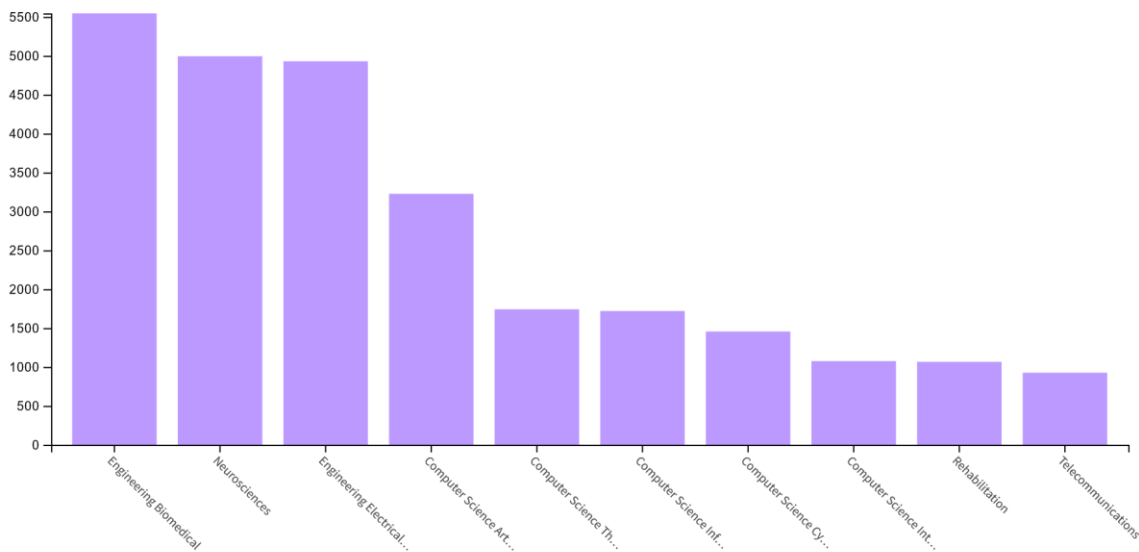
İnsan beyninin keşfedilen bir başka davranış biçimi ise belirli bir frekansta (pratikte daha çok 1-10 Hz arasında uyaran serisi kullanılır) yanıp sönen bir uyaran serisinde oksipital bölgeden kaydedilen EEG sinyallerinde aynı frekansa sahip baskın bir frekansın bileşenin ortaya çıkmasıdır. Beynin bu tepki özelliğinden faydalanarak oluşturulan sistemlere Durağan Durum Görsel Uyarılmış Potansiyellere Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzleri (DDGUPD- BBA) denilir [21]. BBA uygulamasının daha iyi anlaşılması için Şekil 3 örnek olarak verilebilir. Bu şekilde gösterildiği gibi kullanıcı farklı frekanslarda yanıp sönen hücrelerden hangisine dikkat ederse o frekans oksipital bölgedeki nöral aktivitede oluşur ve sayısal işaret işleme yöntemleri ile ki burada Fourier Dönüşümü önerilen en iyi yöntemdir, bu tespit edilir. Ardından bu hücreye ait komut elektronik cihaza ya da yazılıma yerine getirilmesi için gönderilir. P300 tabanlı BBA'lardaki avantaj ve dezavantajlarının yanında sınırlı sayıya komut hücresi üretilebilmesi önemli bir başka dezavantajı olarak kabul edilir.



Şekil 3. DDGUPD- BBA için örnek bir paradigma ekranı

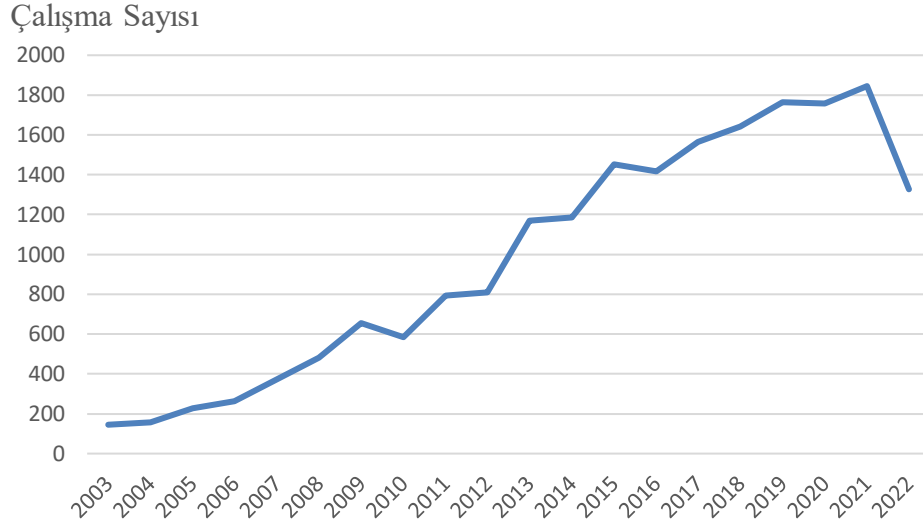
### 4. Beyin Bilgisayar Arayüzlerinin Geleceği

Web of Science (WoS) üzerinden *brain computer interface* ve *brain machine interface* anahtar kelimeleri ile birlikte konu (*ing. topic*) bazında arama yapıldığında toplam 19.901 çalışma sonucu gösterilmiştir. Bu sonuçların en yüksek ilk 10 disipline göre dağılımı Şekil 4'te verilmiştir [22]. Buna göre BBA alanına en yüksek ilgilinin biyomedikal mühendisliğinden olduğu anlaşılmaktadır.

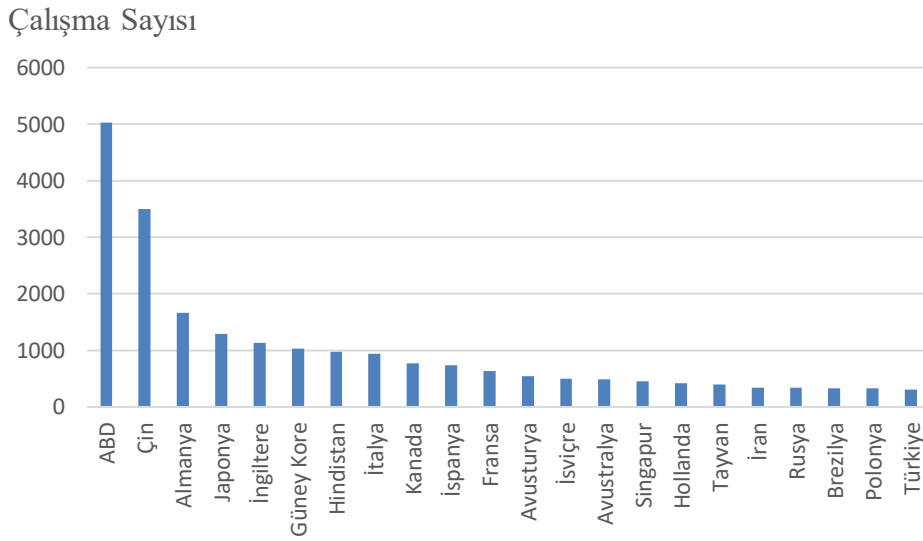


Şekil 4. WoS tarama sonucu

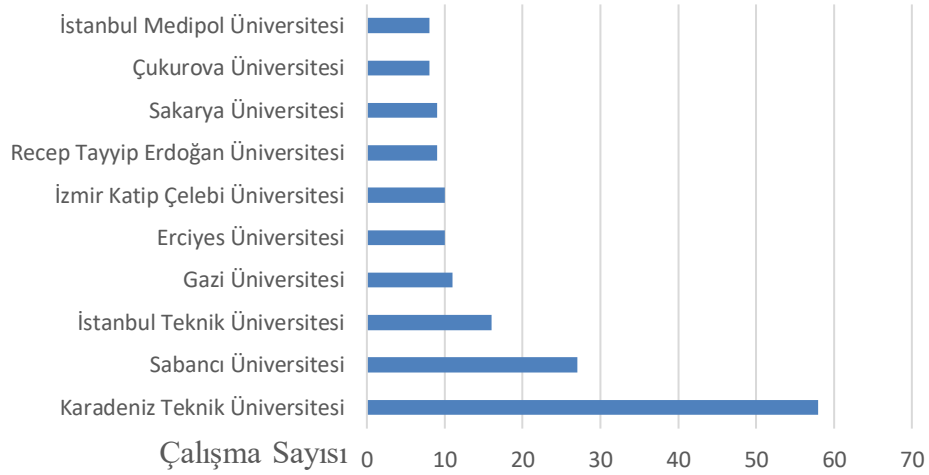
Bu sonuçların son 20 yıldaki sayıları ise Şekil 5'te verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi bu alana olan ilgi giderek artış göstermektedir. Öte yandan 2022 yılına ait son sonuçların tam olarak oluşmadığını ifade etmek gerekir.



Şekil 5. Dünyada BBA'nın son 20 yıldaki yayın sayıları



Şekil 6. Ülkelerin BBA alanındaki ürettikleri toplam yayın sayıları



**Şekil 7.** Türkiye’de BBA alanında yayın üreten il 10 üniversite ve yayın sayıları

WoS sonuçlarına göre dünyada bu alana olan ilginin giderek arttığı ve özellikle teknolojiye dünyada önde gelen ABD ve Çin’in bu teknolojik çalışmalarda başı çektiği görülmektedir. Özellikle sadece felçli bireylerin değil aynı zamanda sağlıklı bireylerin de bu teknolojiyi kullanabilecekleri yazılımsal ve donanımsal uygulamalar geliştiriliyor olması bu teknolojinin ticari kapasitesinin dünya çapında olacağını göstermektedir. Benzer değerlendirmeyi öngören 2016 yılında kurulan ABD merkezli *Neuralink Corporation* şirketi Neuralink adını verdiği çalışması ile bu teknolojiyi ticarileştirmek için yoğun mesai ve para harcamaktadır. Neuralink ile saç derisi üzerinden kaydedilen nöral aktivitenin pratik olmayan yönlerinin ortadan kaldırılmak istenmektedir. Şirket, EEG tekniği yerine implante edilebilir BBA’lar geliştirmek amacındadır. Bir nevi elektrokortikogram (ECoG) tekniğine benzer şekilde kafatasından milimetre hassasiyetinde açılacak delikle beyin üzerine yerleştirilecek nöral aktivite kayıt yöntemi geliştirmek amaçlanmaktadır. Bu yöntemin dakikalar içerisinde ve kişiye acı vermeyen biçimde olması istenmektedir. Aynı zamanda istenmesi durumunda implantın daha sonra yine zararsız ve acı vermeyen yöntemle yerinden çıkarılabilmesi de hedeflenmektedir. İmplantlı BBA’lar ile kablosuz olarak çevresel cihazlara bağlanacak ve birçok cihaz sadece düşüncelerle pratik bir şekilde kontrol edilebilecektir. Kullanıcılar cihazlara bağlanmak istendiğinde implant sistemini açık konuma getirecek ve kullanmak istemediğinde dilerse kapalı konuma getirebileceklerdir. Hatta kullanıcılar dilerlerse beyinleri ile internete de bağlanabileceklerdir. Şirket bu temel hedefleri ile bu ürünleri 2025 yılına kadar dünya pazarına çıkartmak istemektedir. Bu ürünlerin ticarileşmesi ile birlikte özellikle bu alanda siber güvenlik kavramı çok daha ön plana çıkacağı düşünülmektedir. Kablosuz yollarla nöral aktivitenin başka cihazlara aktarılması sırasında bu verileri casus yazılım ve donanımların da kopyalaması, hatta verileri manipüle etmesi gelecekte geniş yankı uyandıracaktır. Dahası, gelişen sinir bilimi çalışmaları ile birlikte insan düşüncelerini etkilemek için harici bir kaynakla beyine girişimde dahi bulunma sahası kötü amaçlı yazılımlarla yapılması olasıdır. Bu yaklaşım askeri amaçlı da kullanılabilir. Gelecekte BBA alanında ortaya çıkacak gelişmeler dikkate alındığında hem sinir bilimi hem de nöral siber güvenlik konuları yakın geleceğin trend çalışma sahalarından olacaktır.

### Çıkar Çatışması

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

### Kaynakça

- [1] Guo, X., Shen, Z., Zhang, Y., & Wu, T. (2019). Review on the application of artificial intelligence in smart homes. *Smart Cities*, 2(3), 402-420.
- [2] Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., & De Felice, F. (2020). Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: Progress, trends, and directions. *Sustainability*, 12(2), 492.
- [3] Pandian, A. P. (2019). Artificial intelligence application in smart warehousing environment for automated logistics. *Journal of Artificial Intelligence*, 1(02), 63-72.

- [4] Aydemir, Ö. (2008). Beyin bilgisayar arayüzü uygulamalarına yönelik EEG işaretleri için öznitelik çıkarma Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5] Siuly, S., & Li, Y. (2012). Improving the separability of motor imagery EEG signals using a cross correlation-based least square support vector machine for brain-computer interface. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 20(4), 526-538.
- [6] Kaur, A. (2021). Wheelchair control for disabled patients using EMG/EOG based human machine interface: a review. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 45(1), 61-74.
- [7] Li, H., Ding, M., Zhang, R., & Xiu, C. (2022). Motor imagery EEG classification algorithm based on CNN-LSTM feature fusion network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 72, 103342.
- [8] Pérez-Reynoso, F. D., Rodríguez-Guerrero, L., Salgado-Ramírez, J. C., & Ortega-Palacios, R. (2021). Human-Machine Interface: Multiclass Classification by Machine Learning on 1D EOG Signals for the Control of an Omnidirectional Robot. *Sensors*, 21(17), 5882.
- [9] Wolpaw, J. R., McFarland, D. J., Neat, G. W., & Forneris, C. A. (1991). An EEG-based brain-computer interface for cursor control. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 78(3), 252-259.
- [10] Marshall, D., Coyle, D., Wilson, S., & Callaghan, M. (2013). Games, gameplay, and BCI: the state of the art. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 5(2), 82-99.
- [11] Zabcikova, M., Koudelkova, Z., Jasek, R., & Lorenzo Navarro, J. J. (2022). Recent advances and current trends in brain-computer interface research and their applications. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 82(2), 107-123.
- [12] Kosmyna, N., Tarpin-Bernard, F., Bonnefond, N., & Rivet, B. (2016). Feasibility of BCI control in a realistic smart home environment. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 416.
- [13] Aydemir, Ö., & Kayıkçıoğlu, T. (2009). EEG tabanlı beyin bilgisayar arayüzleri. *Akademik Bilişim*, 9, 11-13.
- [14] Ahn, M., & Jun, S. C. (2015). Performance variation in motor imagery brain-computer interface: a brief review. *Journal of neuroscience methods*, 243, 103-110.
- [15] Zhang, J., & Wang, M. (2021). A survey on robots controlled by motor imagery brain-computer interfaces. *Cognitive Robotics*, 1, 12-24.
- [16] Quiles, E., Suay, F., Candela, G., Chio, N., Jiménez, M., & Álvarez-Kurogi, L. (2020). Low-cost robotic guide based on a motor imagery brain-computer interface for arm assisted rehabilitation. *International journal of environmental research and public health*, 17(3), 699.
- [17] Leeuwis, N., Paas, A., & Alimardani, M. (2021). Vividness of visual imagery and personality impact motor-imagery brain computer interfaces. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 634748.
- [18] Loizidou, P., Rios, E., Marttini, A., Keluo-Udeke, O., Soetedjo, J., Belay, J., ... & Speier, W. (2022). Extending brain-computer interface access with a multilingual language model in the P300 speller. *Brain-Computer Interfaces*, 9(1), 36-48.
- [19] Korkmaz, O. E., Aydemir, O., Oral, E. A., & Ozbek, I. Y. (2022). An efficient 3D column-only P300 speller paradigm utilizing few numbers of electrodes and flashings for practical BCI implementation. *PloS one*, 17(4), e0265904.
- [20] Won, K., Kwon, M., Ahn, M., & Jun, S. C. (2022). EEG Dataset for RSVP and P300 Speller Brain-Computer Interfaces. *Scientific Data*, 9(1), 1-11.
- [21] Ahn, S., Kim, K., & Jun, S. C. (2016). Steady-state somatosensory evoked potential for brain-computer interface—present and future. *Frontiers in human neuroscience*, 716.
- [22] <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>





## Mo Eklenmiş NiMnSbB Alaşımlarında Manyetik Alan Kaynaklı Martensitik Dönüşüm Özelliklerinin Belirlenmesi

Murat AYYILDIZ<sup>1</sup>, Gökhan KIRAT<sup>2</sup>, Mehmet Ali AKSAN<sup>3</sup>

(Alınış / Received: 19.12.2022, Kabul / Accepted: 27.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Martensitik dönüşüm,  
Manyetik alan kaynaklı  
martensitik faz dönüşümü,  
Manyetik şekil hatırlama.

**Öz:** Bu çalışmada,  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) ferromanyetik şekil hafızalı Heusler alaşımlarının yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Oda sıcaklığında XRD analizi, M0 ve M1 numunelerinde 40 ve 10M fazlarının bir arada bulunduğunu, M3, M5 ve M7 numunelerinin ise kübik  $L2_1$  kristal yapılarına sahip olduğunu göstermiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon analizleri (M-T) sonucunda, üretilen bütün numunelerin martensitik dönüşüm sergiledikleri belirlenmiştir. Faz geçiş sıcaklıkları artan Mo oranı ile azalmıştır. Ayrıca Mo oranının artırılması hem martensit hemde ösenit fazın manyetizasyonunda dikkate değer bir artışa yol açmıştır.  $A_s-A_f$  aralığında belirlenen sabit sıcaklıklarda numunelerin manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşüm sergiledikleri açığa çıkarılmıştır.

## Determination of Magnetic Field Induced Martensitic Transformation Properties in Mo Added NiMnSbB Alloys

### Keywords

Martensitic transformation,  
Magnetic field induced  
martensitic phase  
transformation,  
Magnetic shape memory

**Abstract:** In this study, the structural and magnetic properties of  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) ferromagnetic shape memory Heusler alloys were investigated. Room temperature XRD analysis showed that 40 and 10M phases coexist in M0 and M1 samples, while M3, M5 and M7 samples have cubic  $L2_1$  crystal structures. As a result of temperature dependent magnetization analysis (M-T), it was determined that all samples produced exhibited martensitic transformation. Phase transition temperatures decreased with increasing Mo content. In addition, increasing the Mo content led to a significant increase in the magnetization of both the martensite and the austenite phase. It is revealed that the samples exhibit magnetic field-induced martensitic transformation at constant temperatures determined in the  $A_s-A_f$  range.

<sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya, Türkiye

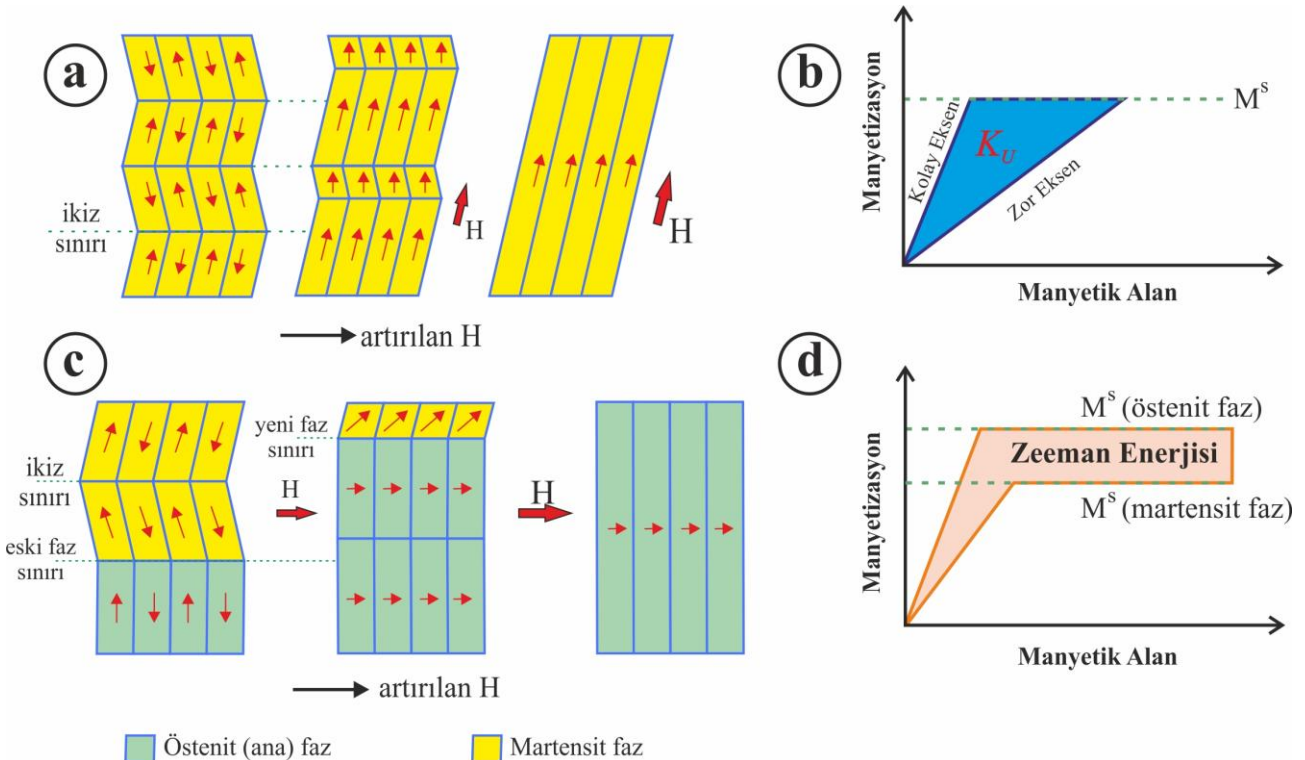
<sup>2</sup> İnönü Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi, Malatya, Türkiye

<sup>3</sup> İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya, Türkiye

## 1. Giriş

Martensitik dönüşüm (MT), katı formda herhangi bir difüzyon olmaksızın gerçekleşen birinci dereceden yapısal bir faz dönüşümüdür. MT sırasında, östenit olarak adlandırılan yüksek sıcaklık fazı, martensit olarak adlandırılan düşük sıcaklık fazına dönüşür [1]. Şekil hatırlama etkisi (SME) ise, martensitik dönüşüm sergileyen bazı alaşım gruplarının sahip olduğu önemli bir özelliktir. Şekil hafızalı alaşımların (SMA) önemli karakteristik özelliklerinden biri, martensit fazında gerilme ile deforme edildikten sonra östenit fazına dönüştüklerinde orijinal şekillerini geri kazanmalarıdır [2]. Buna ek olarak, SMA' lar mükemmel korozyon direnci ve süper elastikiyet gibi birçok kullanışlı mekanik özelliklere sahiptirler [3]. Bu nedenle, SMA' lar son yıllarda birçok bilimsel çalışmaya konu olmuş ve stentler, gözlük çerçeveleri, hassas termal sensörler, mikroaktüatörler, elektronik cihazlar, manyetik alan sensörleri, valfler ve tıbbi cihazlar gibi endüstriyel uygulamalarda da yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır [4].

Geleneksel SMA'da şekil geri kazanımı genellikle ısı ile tetiklenirken, ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlarda (FSMA) ise şekil geri kazanımı ısının yanı sıra manyetik alan ile de kontrol edilebilir [4]. Piezoelektrik ve manyetostriktif malzemeler gibi geleneksel aktüatör malzemelerine kıyasla uygulanan manyetik alana bağlı olarak daha yüksek gerinim elde edilmesi FSMA'ya olan ilgiyi artırmaktadır. Örneğin manyetostriktif Terphenol-D malzemesinde yaklaşık 60 MPa stres ve 0,3 T manyetik alan altında <math><0,2\%</math>'lik bir gerinim elde edilebilirken, FSMA'da %10'a kadar manyetik alan kaynaklı gerinim elde edilebilmektedir [5]. FSMA'da harici bir manyetik alan uygulanması sonucunda manyetik alan kaynaklı iki farklı gerinim (MFIS) mekanizması meydana gelebilir. Bunlardan ilki manyetik alan kaynaklı martensitik ikiz varyant yeniden yönlendirme, ikincisi ise manyetik alan kaynaklı yapısal faz dönüşümüdür. İlk mekanizma olan manyetik alan kaynaklı yeniden yönlendirme (MIR), harici manyetik alan tarafından tetiklenen ikiz sınır hareketinin bir sonucu olarak kristal yapıda bir değişiklik olmaksızın mikroyapının yeniden düzenlenmesidir (Şekil 1.a.). Bir martensit varyantının manyetokristal anizotropi enerjisi (MAE) ikiz sınır hareketi için gereken enerjiden daha büyükse, MAE MIR için itici bir kuvvet görevi görür. MAE, ferromanyetik tek martensit varyantın kolay ve zor eksenleri boyunca mıknatıslanmaları arasındaki farktan belirlenir (Şekil 1.b.). MFIS'i indüklemek için bir başka olası mekanizma ise manyetik alan kaynaklı yapısal faz dönüşümüdür (MFIPT). Bu mekanizmada, her iki fazın (östenit ve martensit) bir arada bulunduğu belirli bir sıcaklıkta dış manyetik alanın artırılmasıyla kristal yapı martensitten östenite dönüşür (Şekil 1.c.) [6]. Mevcut fazların Zeeman enerjileri arasındaki fark MFIPT için itici kuvvet görevi görür ve bu fark faz sınırlarını hareket ettirmek için gereken enerjiden daha yüksek olmalıdır (Şekil 1.d.). Harici manyetik  $\mu_0 H$  ile ve dönüşüm fazları (martensit ve östenit) arasındaki manyetizasyon farkı  $\Delta M$  ile gösterildiğinde, Zeeman enerjisi  $E_{zeeman} = \mu_0 H \Delta M$  şeklinde ifade edilebilir [7].



**Şekil 1.** (a) Artan dış manyetik alanın MIR üzerindeki etkisi (b) MIR'den sorumlu MAE ( $K_u$ ) (c) Artan dış manyetik alanın MFIPT üzerindeki etkisi (d) MFIPT'den sorumlu östenit ve martensit fazları arasındaki Zeeman enerji farkı [5,6]

Mevcut çalışmada, Molibden katkısının  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) FSMA' rının yapısal, manyetik ve MFIPT özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

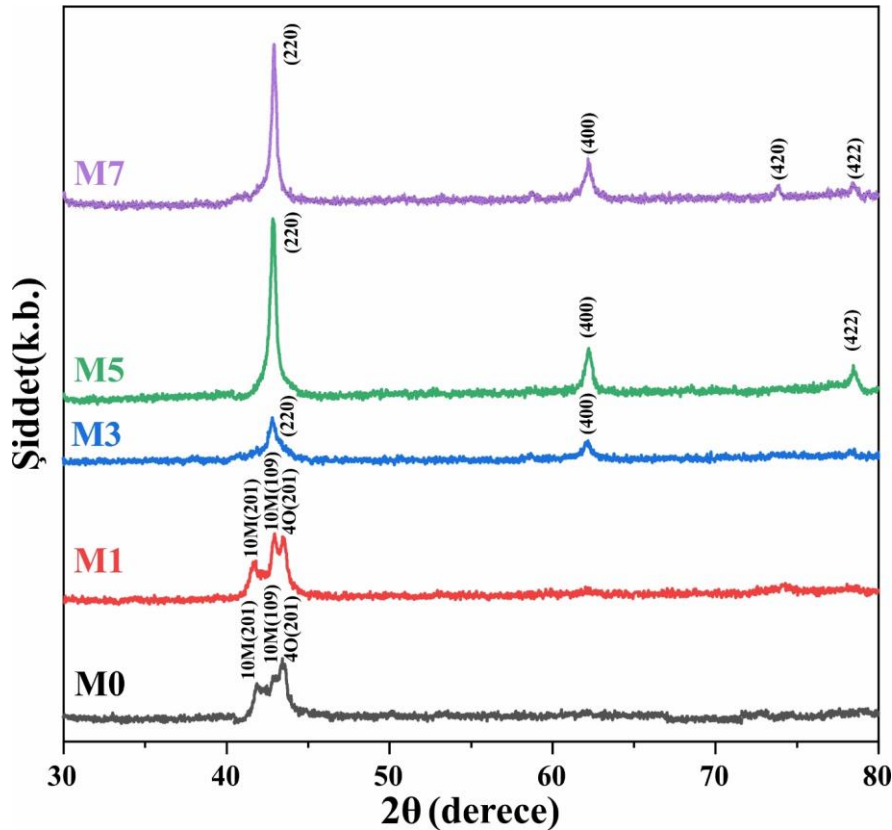
## 2. Meteryal ve Metot

$Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) ferromanyetik şekil hafızalı Heusler alaşımları, saf Ni, Mo, Mn, Sb ve B (saflikları %99,99'dan yüksek) tozları kullanılarak ark eritme fırını ile külçe formunda üretilmiştir. Eritme işlemi argon atmosferinde plazma oluşturularak ve numuneler üzerinden  $\sim 150$  A' lik bir akım geçirilerek gerçekleştirilmiştir. Homojen numuneler elde edebilmek için numuneler döndürülerek eritme işlemi birkaç kez tekrarlanmıştır. İstenilen kristal yapıyı elde edebilmek için, üretilen numuneler  $875$  °C'de 24 saat ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından buzlu suda soğutulmuştur. Isıl işlem sırasında numunelerin oksitlenmelerini önlemek için numuneler vakumlu kuvars tüpe yerleştirilmiştir. Örnekler sırasıyla M0 ( $x=0$ ), M1 ( $x=1$ ), M3 ( $x=3$ ), M5 ( $x=5$ ) ve M7 ( $x=7$ ) olarak etiketlenmiştir. Mn içeren Heusler alaşımlarının üretimi sırasında Mn buharlaşması hedeflenen stokiyometriye ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Önceki deneyimlerimize dayanarak Mn buharlaşmasını engellemek için bütün numunelere %2 oranında Bor eklenmiştir [8,9].

Örneklerin oda sıcaklığındaki kristal yapıları "Rigaku Miniflex 600" bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile  $CuK\alpha$  ( $\lambda=1.5405$  Å) radyasyonu kullanılarak belirlenmiştir. Manyetizasyon ölçümleri Quantum Dizayn PPMS cihazının titreşimli örnek magnetometresi (VSM) ataçmanıyla gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçümleriyle martensitik faz geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Daha sonra her bir numunede manyetik alan kaynaklı faz dönüşümünü detaylı analiz etmek için As (östenit başlangıç) - Af (östenit bitiş) aralığında manyetik alana bağlı manyetizasyon analizleri yapılmıştır.

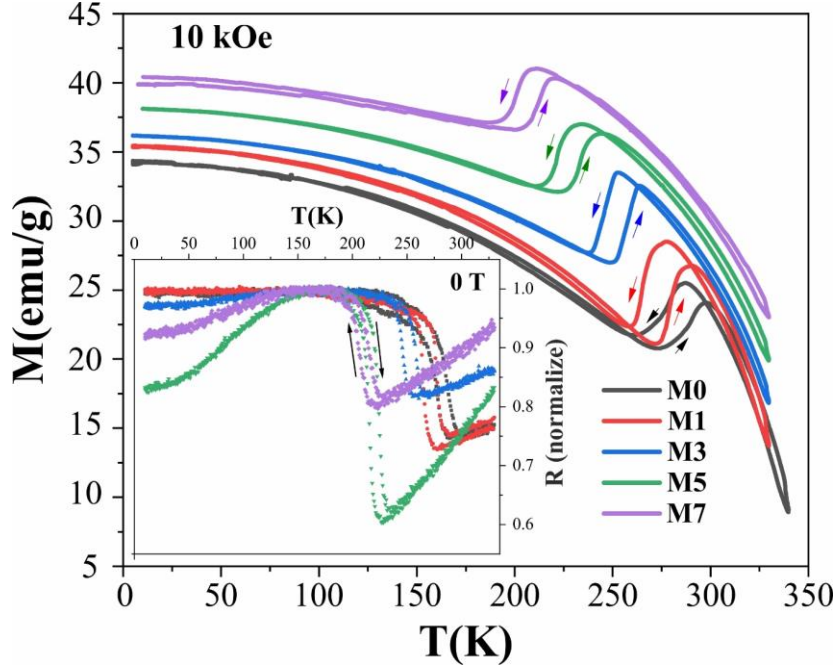
## 3. Bulgular

Yukarıda tartışıldığı gibi, MT sırasında östenit fazı martensit fazına dönüşür. Östenit fazı genellikle kübik  $L2_1$  kristal yapısına sahipken, martensit fazı bileşime ve sıcaklığa bağlı olarak monoklinik 10M ve 14M, ortorombik 4O veya modüle edilmiş tetragonal  $L1_0$  kristal yapılarına sahip olabilir [10–13].  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) örneklerinin XRD desenleri şekil 2'de verilmiştir. M0 ve M1 numunelerinde,  $2\theta \approx 40-45^\circ$  arasındaki pikler 4O fazının (201) piki ve 10M fazının (109) ve (201) pikleridir. M3 numunesinde martensit fazın varlığını gösteren 4O fazına ait (201) piki ve 10M fazına ait (109) ve (201) piklerinin kaybolduğu görülmüştür ve



Şekil 2. M0, M1, M3, M5 ve M7 numunelerinin XRD desenleri

bununla birlikte, Fm3m uzay grubuna sahip kübik L2<sub>1</sub> fazının (220) ve (400) pikleri oluşmuştur. Sistemdeki Mo içeriğinin daha da artmasıyla yapısal özelliklerin değiştiği gözlemlenmiştir. M5 örneğinde ise ortorombik ve monoklinik fazların pikleri elde edilememiş ve buna ek olarak L2<sub>1</sub> fazının (220), (400) ve (422) piklerinin varlığı tespit edilmiştir. En yüksek Mo oranına sahip M7 örneğinde ise M5 de elde edilen piklere ek olarak, yine kübik L2<sub>1</sub> fazına ait (420) piki gözlemlenmiştir. Elde edilen XRD analiz sonuçlarından, ölçümlerin gerçekleştirildiği oda sıcaklığında Mo içeriği düşük olan numunelerde martensit fazının varlığını gösteren 40 ve 10M fazları elde edilirken, yüksek Mo içeren numunelerde ise östenit fazın varlığına atfedilen L2<sub>1</sub> fazına ait pikler elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre düşük sıcaklık fazı olan martensit faza M0 ve M1 numunelerine oda sıcaklığında ulaşılmıştır. M3, M5 ve M7 numunelerinde ise martensit faza ulaşmak için daha düşük sıcaklıklara gitmek gerekmektedir. Böylece katkılama ile faz geçiş sıcaklıklarının azalması beklenebilir.



Şekil 3. M0, M1, M3, M5 ve M7 numunelerinin M-T eğrileri

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda MT sırasında manyetizasyon değerindeki ani artış (ısıtma eğrisinde) veya azalma (soğutma eğrisinde) alایشim sisteminde meydana gelen faz dönüşümünü karakterize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ni<sub>50-x</sub>Mo<sub>x</sub>Mn<sub>37</sub>Sb<sub>13</sub>+B<sub>2</sub> (x=0, 1, 3, 5 ve 7) örneklerinin 10 kOe manyetik alan altında gerçekleştirilen sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçüm sonuçları şekil 3' de verilmiştir. Isıtma sürecinde manyetizasyon eğrilerinde elde edilen keskin artışlar ve soğutma sürecinde gözlemlenen azalmalar bütün numunelerin martensitik dönüşüm sergilediğini açıkça göstermektedir. Aşırı Mn içeren NiMnZ (Z=Sn, Sb ve In) Heusler alaşımlarında ekstra Mn atomları Z bölgelerini işgal ederler. Düzenli Mn bölgelerindeki Mn iyonları arasındaki manyetik etkileşim ferromanyetik iken kendi bölgelerinde bulunan Mn iyonları ile Z bölgesini işgal eden Mn iyonları arasındaki manyetik etkileşim antiferromanyettir. Daha düzenli östenit fazından martensit fazına dönüşüm sırasında, düzen parametresinin azalması ve yukarıda bahsedilen antiferromanyetik etkileşimlerin artması, dönüşüm sırasında (östenitten martensite) manyetizasyonda oluşan azalmanın temel nedenleridir. Isıtma ve soğutma eğrileri arasında elde edilen termal histeresiz martensit fazda oluşan ikiz sınırları arasındaki sürtünmelerden kaynaklanır [14]. Öyleki bu sürtünme faz dönüşümü için daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulmasına sebep olur ve sonuç olarak bir termal histeresiz bölgesi elde edilir. Ayrıca literatürde ise bu tip bir davranışın birinci dereceden faz geçişlerinin doğasında bulunduğu da değinilmiştir [15]. Ayrıca, M-T analizlerinden Mo miktarının artması ile faz geçiş sıcaklığının azaldığı ve manyetizasyonun büyüklüğünün arttığı belirlenmiştir. Heusler alaşımların martensitik dönüşüm sıcaklığının atom başına düşen valans elektronu (e/a) ile doğru orantılı olarak değiştiği rapor edilmiştir [16–20]. Ni (10) yerine daha az valans elektronuna sahip olan Mo (6) atomlarının yerleştirilmesi faz geçiş sıcaklıklarının azalmasına neden olacağı açıktır. Heusler alaşımlarının manyetizasyonu genellikle Mn atomlarından kaynaklanır. Ni atomlarının antiparalel olarak hizalanmaları toplam manyetizasyona katkılarının oldukça zayıf olmasına yol açar ve toplam manyetizasyon Mn atomlarının birbirleri ile ve diğer atomlarla olan manyetik etkileşimlerinden kaynaklanır. Bu nedenle sisteme ikame ettirilen çeşitli geçiş metalleriyle birim hücre parametreleri ve atomlar arasındaki mesafeyi modifiye ederek Heusler alaşımlarının manyetik özelliklerini geliştirmek mümkündür. Ni yerine yaptığımız Mo katkılaması birim hücrede küçülmeye neden olmuştur ve bunun sonucunda ise hem martensit fazın hem de östenit fazın manyetizasyonları artmıştır. Şekil 3' de iç şekilde numunelerin normalize edilmiş elektriksel direnç-sıcaklık eğrileri verilmiştir. Herhangi bir harici manyetik alan uygulanmadan elde edilen R-T

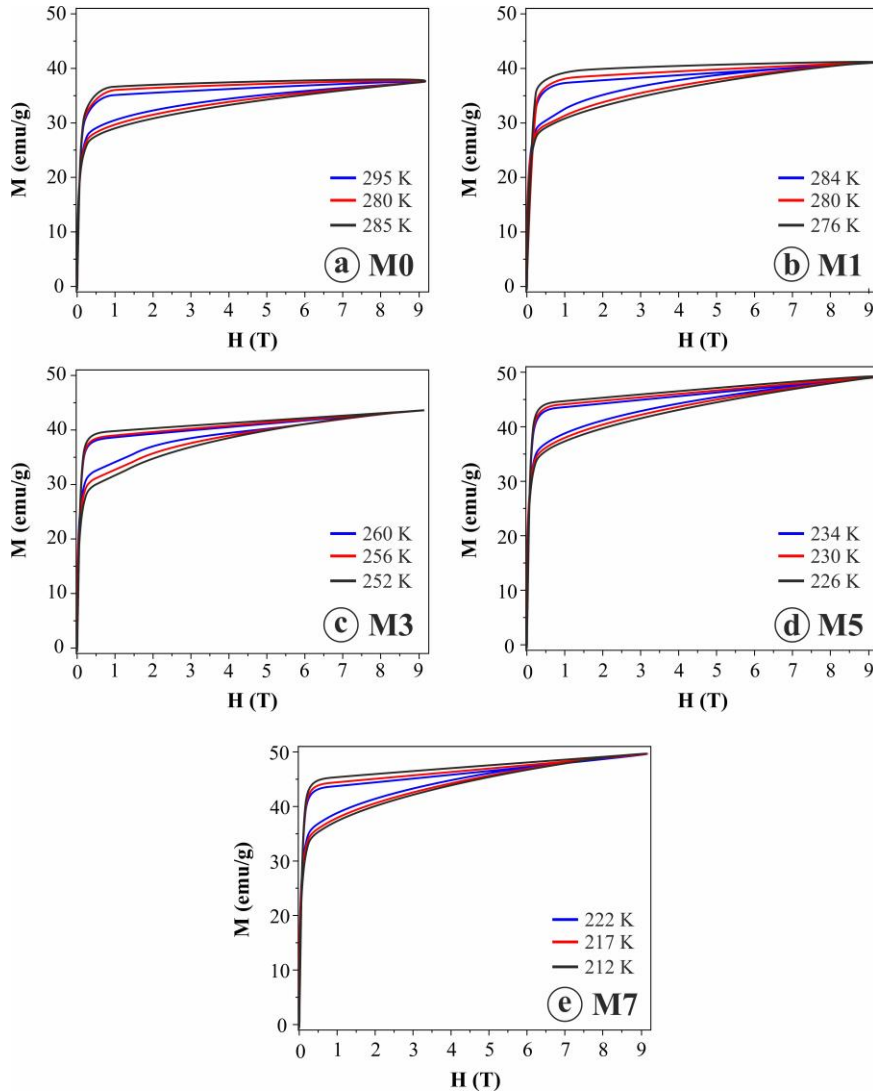
eğrilerinden belirlenen faz geçiş sıcaklıkları ile 10 kOe manyetik alan altında gerçekleştirilen M-T eğrilerinden tespit edilen faz geçiş sıcaklıkları kıyaslandığında, uygulanan harici manyetik alanın faz geçiş sıcaklıklarını azalttığı görülmektedir (tablo1). Harici manyetik alanın uygulanmasıyla faz geçiş sıcaklıklarında meydana gelen kayma Clausius-Clapeyron denklemi ile açıklanır [6,21,22];

$$\frac{dB}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta M} \text{ ve } \Delta T \approx \left(\frac{\Delta M}{\Delta S}\right)\Delta B \quad (1)$$

burada T sıcaklığı, B uygulanan manyetik alanı,  $\Delta M$  ve  $\Delta S$  ise sırasıyla östenit ve martensit fazları arasındaki manyetizasyon ve entropideki farkını göstermektedir.

**Tablo 1.** M0, M1, M3, M5 ve M7 numunelerinin martensitik faz geçiş sıcaklıkları ve e/a değerleri

Malzeme	Manyetik Alan	M <sub>s</sub> (K)	M <sub>f</sub> (K)	A <sub>s</sub> (K)	A <sub>f</sub> (K)	e/a
M0	0 T	286	268	277	299	8.24
	1 T	284	262	274	297	
M1	0 T	271	261	274	286	8.20
	1 T	269	260	270	282	
M3	0 T	253	240	251	263	8.12
	1 T	251	238	249	262	
M5	0 T	226	212	223	236	8.04
	1 T	224	210	221	234	
M7	0 T	215	197	206	224	7.96
	1 T	207	195	203	218	



**Şekil 4.** Her bir numune için A<sub>s</sub>-A<sub>f</sub> aralığına denk gelen sıcaklıklarda M-H eğrileri (a)M0, (b)M1, (c)M3, (d)M5 ve (e)M7



Her bir numune için belirlenen ve  $A_s$ - $A_f$  aralığına denk gelen üç farklı sabit sıcaklıkta (bu sıcaklıklar her numuneye göre farklılık göstermektedir) numunelerin manyetik alana bağlı manyetizasyon ölçümleri yapılmıştır ve sonuçlar şekil 4' de verilmiştir. Her bir ölçümden önce numuneler tamamen martensit faza geçene kadar soğutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan manyetizasyon ve demanyetizasyon eğrileri arasında bir fark olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda bu fark manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşümün varlığına atfedilmiştir [23–26]. Önceki kısımda açıklandığı gibi manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşümün oluşabilmesi için her iki fazın birlikte bulunması gerekmektedir. Martensit fazdan östenite geçişin olduğu  $A_s$ - $A_f$  aralığı yapısal faz geçişini elde edebilmek için elverişli bir sıcaklık aralığıdır. Bu aralıkta belirlenen sabit sıcaklıkta martensit ve östenit fazları birlikte bulunur ve harici manyetik alanın artırılmasıyla güçlü manyetizasyona sahip östenit fazın manyetizasyonu hızlı bir şekilde artarken daha zayıf manyetik etkileşimlere sahip olan martensit fazın manyetizasyonu nispeten daha yavaş artar. Ayrıca manyetik alanın artırılmasıyla her iki fazın Zeeman enerjileri arasındaki farktan dolayı martensit fazdan östenit faza yapısal dönüşüm başlar. Harici manyetik alan kritik bir seviyeye ulaşıncaya kadar materyal tamamen östenit faza dönüşür. Bundan sonra manyetizasyon azaltılsa bile numune daha yüksek doyum manyetizasyonuna sahip olan östenit fazda kalır. Bu fenomen manyetik alan kaynaklı martensitik faz dönüşümünün karakteristik bir davranışdır. Mevcut teorik ve literatür bilgileri ile uyum içerisinde olan elde edilen deneysel sonuçlar Mo katkılı NiMnSb+B alaşımlarının başarılı bir şekilde manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşüm sergilediğini göstermektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, standart ark eritme yöntemiyle üretilen  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13+B_2}$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) örneklerinin yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. XRD desenleri oda sıcaklığında M0 ve M1 numunelerinde martensit fazın varlığına atfedilen 40 ve 10M fazlarının birlikte bulunduğunu göstermiştir. M3 M5 ve M7 numunelerinde ise östenit fazın var olduğunu gösteren  $L2_1$  kristal yapısına ait pikler elde edilmiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçümleri bütün numunelerin martensitik dönüşüm sergilediğini açığa çıkarmıştır. Mo miktarının artırılmasıyla faz geçiş sıcaklıkları azalmıştır. Ayrıca Mo içeriğinin artırılması manyetizasyon değerinin artmasına yol açmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak yapılan ölçümler yardımıyla  $A_s$ - $A_f$  aralığı belirlenmiş ve bu sıcaklık aralığında kalan bazı sabit sıcaklıklarda manyetik alana bağlı manyetizasyon ölçümleri yapılmıştır. Manyetizasyon ve demanyetizasyon eğrileri arasında oluşan fark numunelerin manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşüm sergilediğini göstermektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri birimi tarafından FDK-2022-2892 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Yazar Katkı Oranları

Mevcut çalışmada Murat AYYILDIZ, numunelerin hazırlanması ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi, Gökhan KIRAT modelin oluşturulması, literatür taraması, verilerin toparlanması ve işlenmesinde ve makalenin yazımında, Mehmet Ali AKSAN fikrin oluşturulması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesine katkıda bulunmuştur.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar. Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Kaynakça

- [1] Pérez-Landazábal, J. I., Recarte, V., Sánchez-Alarcos, V., Gómez-Polo, C., Kustov, S., & Cesari, E. (2011). Magnetic field induced martensitic transformation linked to the arrested austenite in a Ni-Mn-In-Co shape memory alloy. *Journal of Applied Physics*, 109(9).
- [2] Han, Z. D., Wang, D. H., Zhang, C. L., Xuan, H. C., Zhang, J. R., Gu, B. X., & Du, Y. W. (2008). The phase transitions, magnetocaloric effect, and magnetoresistance in Co doped Ni-Mn-Sb ferromagnetic shape memory alloys. *Journal of Applied Physics*, 104(5).
- [3] Desroches, R., & Smith, B. (2004). Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(3), 415–429.

- [4] Kirat, G. (2021). Exchange Bias Effect in NiMnSbB Ferromagnetic Shape Memory Alloys Depending on Mn Content. *Adiyaman University Journal of Science*, 11, 444–455.
- [5] Karaca, H. E., Karaman, I., Basaran, B., Lagoudas, D. C., Chumlyakov, Y. I., & Maier, H. J. (2007). On the stress-assisted magnetic-field-induced phase transformation in Ni<sub>2</sub>MnGa ferromagnetic shape memory alloys. *Acta Materialia*, 55(13), 4253–4269
- [6] Karaca, H. E., Karaman, I., Basaran, B., Ren, Y., Chumlyakov, I., & Maier, H. J. (2009). *Magnetic Field-Induced Phase Transformation in NiMnCoIn Magnetic Shape-Memory Alloys — A New Actuation Mechanism with Large Work Output*. 983–998.
- [7] Zhang, H., Zhang, X., Qian, M., Yao, Z., Wei, L., & Geng, L. (2020). Increasing working temperature span in Ni-Mn-Sn-Co alloys via introducing pores. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 500(November 2019), 166359.
- [8] Kirat, G., Aksan, M. A., & Aydogdu, Y. (2019). Magnetic field induced martensitic transition in Fe doped Ni-Mn-Sn-B shape memory ribbons. *Intermetallics*, 111(October 2018), 106493.
- [9] Kirat, G., Kizilaslan, O., & Aksan, M. A. (2019). Journal of Magnetism and Magnetic Materials Magnetoresistance properties of magnetic Ni-Mn-Sn-B shape memory ribbons and magnetic field sensor aspects operating at room temperature. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 477(January), 366–371.
- [10] Zheng, H., Wang, W., Xue, S., Zhai, Q., & Frenzel, J. (2013). Composition-dependent crystal structure and martensitic transformation in Heusler Ni – Mn – Sn alloys. *Acta Materialia*, 61(12), 4648–4656.
- [11] Kirat, G., & Aksan, M. A. (2021). Influence of the Cu substitution on magnetic properties of Ni-Mn-Sn-B shape memory ribbons. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 127(2), 1–9.
- [12] Pons, J., Chernenko, V. A., Santamarta, R., & Cesari, E. (2000). Crystal structure of martensitic phases in Ni-Mn-Ga shape memory alloys. *Acta Materialia*, 48(12), 3027–3038.
- [13] Deltell, A., Escoda, L., Saurina, J., & Suñol, J. J. (2015). *Martensitic Transformation in Ni-Mn-Sn-Co Heusler Alloys*. 695–705.
- [14] Wang, W.-H., Chen, J.-L., Liu, Z., Wu, G.-H., & Zhan, W.-S. (2001). Thermal hysteresis and friction of phase boundary motion in ferromagnetic Ni<sub>52</sub>Mn<sub>23</sub>Ga<sub>25</sub> single crystals, *Physical Review B*, 65(1), 012416.
- [15] Dos Reis, R. D., Caron, L., Singh, S., Felser, C., & Nicklas, M. (2021). Direct and indirect determination of the magnetocaloric effect in the heusler compound Ni<sub>1.7</sub>Pt<sub>0.3</sub>MnGa. *Entropy*, 23(10), 1–10.
- [16] Hernando, B., Llamazares, J. L. S., Santos, J. D., Sánchez, M. L., Escoda, L., Suñol, J. J., Varga, R., García, C., & González, J. (2009). Grain oriented NiMnSn and NiMnIn Heusler alloys ribbons produced by melt spinning: Martensitic transformation and magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(7), 763–768.
- [17] Xuan, H. C., Zheng, Y. X., Ma, S. C., Cao, Q. Q., Wang, D. H., & Du, Y. W. (2010). The martensitic transformation, magnetocaloric effect, and magnetoresistance in high-Mn content Mn<sub>47+x</sub>Ni<sub>43-x</sub>Sn<sub>10</sub> ferromagnetic shape memory alloys. *Journal of Applied Physics*, 108(10), 1–5.
- [18] Krenke, T., Acet, M., & Wassermann, E. F. (2005). *Martensitic transitions and the nature of ferromagnetism in the austenitic and martensitic states of Ni- Mn- Sn alloys*. 1–9.
- [19] Llamazares, J. L. S., Quintana-Nedelcos, A., Ríos-Jara, D., Sánchez-Valdes, C. F., García-Fernández, T., & García, C. (2016). The effect of low temperature thermal annealing on the magnetic properties of Heusler Ni-Mn-Sn melt-spun ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 401, 38–43.
- [20] Zayak, A. T., Adeagbo, W. A., Entel, P., & Rabe, K. M. (2010). *e a dependence of the lattice instability of cubic Heusler alloys from first principles e / a dependence of the lattice instability of cubic Heusler alloys*. 111903(2006), 5–8.
- [21] Zhang, B., Zhang, X. X., Yu, S. Y., Chen, J. L., Cao, Z. X., & Wu, G. H. (2007). Giant magnetothermal conductivity in the Ni-Mn-In ferromagnetic shape memory alloys. *Applied Physics Letters*, 91(1), 89–92.

- [22] Yu, S. Y., Cao, Z. X., Ma, L., Liu, G. D., Chen, J. L., Wu, G. H., Zhang, B., & Zhang, X. X. (2007). Realization of magnetic field-induced reversible martensitic transformation in NiCoMnGa alloys. *Applied Physics Letters*, 91(10).
- [23] Kainuma, R., Imano, Y., Ito, W., Sutou, Y., Morito, H., Okamoto, S., Kitakami, O., Oikawa, K., Fujita, A., Kanomata, T., & Ishida, K. (2006). Magnetic-field-induced shape recovery by reverse phase transformation. *Nature*, 439(7079), 957–960.
- [24] Liu, J., Scheerbaum, N., Hinz, D., & Gutfleisch, O. (2008). Magnetostructural transformation in Ni-Mn-In-Co ribbons. *Applied Physics Letters*, 92(16), 35–38.
- [25] Brown, P. J., Gandy, A. P., Ishida, K., Kainuma, R., Kanomata, T., Neumann, K. U., Oikawa, K., Ouladdiaf, B., & Ziebeck, K. R. A. (2006). The magnetic and structural properties of the magnetic shape memory compound  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.44}\text{Sn}_{0.56}$ . *Journal of Physics Condensed Matter*, 18(7), 2249–2259.
- [26] Chen, Z., Cong, D., Li, S., Zhang, Y., Li, S., Cao, Y., Li, S., Song, C., Ren, Y., & Wang, Y. (2021). External-field-induced phase transformation and associated properties in a  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{Fe}_3\text{In}_{13}$  metamagnetic shape memory wire. *Metals*, 11(2), 1–14.